

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Pekka Taina

# **PIENTALON HUONEAKUSTIIKAN PARANTAMINEN**

**Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-  
insinöörin tutkintoa varten Espoossa 15.11.2006**

Työn valvoja: Professori Matti Karjalainen

Työn ohjaaja: TkL Jyrki Kilpikari



TEKNILLINEN KORKEAKOULU

DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä:	Pekka Taina
Työn nimi:	Pientalon huoneakustiikan parantaminen
Päivämäärä:	15.11.2006
Sivumäärä:	75 + 8
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto
Professuuri:	S-89 Akustiikka ja äänenkäsittelytekniikka
Työn valvoja:	Professori Matti Karjalainen
Työn ohjaaja:	TkL Jyrki Kilpikari
<p>Tässä työssä käsitellään nykyään suosiossa olevien, korkean olohuoneen omaavien, kivirakenteisten pientalojen huoneakustiikan parantamista. Työn teoriaosassa käydään läpi perusasioita ja käsitteitä sekä huone- että rakennusakustiikan puolelta. Samalla pohditaan kyseisissä taloissa hyvälle huoneakustiikalle annettavia kriteereitä ja niiden saavuttamista. Työssä esitellään lisäksi erikseen vuonna 2004 julkaistua standardia, SFS 5907 Rakennusten akustinen luokitus, ja tutkitaan sen asettamia ehtoja pientaloille.</p> <p>Kokeellisessa osassa tarkastellaan kolmea kohderakennusta ja niissä tehtäviä huoneakustiikan parannuksia. Kohderakennuksien olohuoneissa mitataan jälkikaiunta-ajat, jonka jälkeen kohteisiin suunnitellaan ja toteutetaan akustointi. Tämän jälkeen mittaukset toistetaan ja tuloksia analysoidaan. Tuloksien ja asukkaiden palautteen perusteella havaitaan olosuhteiden parantuneen selkeästi taloissa.</p> <p>Työssä havaitaan yleisesti, että huoneakustiikka kivitalojen korkeissa olohuoneissa on usein huono. Kaiunta ja äänekkyys kodeissa koetaan suurena ongelmana ja ratkaisuja halutaan. Usein ei kuitenkaan tiedetä, miten tilanteeseen voitaisiin vaikuttaa ja minkälaisia kustannuksia se aiheuttaa. Tilanteisiin pystytään luomaan jälkikäteen hyviäkin parannuksia, mutta asia tulisi ottaa esille jo rakennusten suunnitteluvaiheessa, jotta saataisiin aikaan paremmin teknisesti ja ulkonäöllisesti toimivia ratkaisuja.</p>	
Avainsanat: huoneakustiikka, pientalo, kivitalo, jälkikaiunta-aika, olohuone, akustointi, absorptio, akustinen luokitus, äänieristävyys, kotiteatteri	

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS**

Author:	Pekka Taina
Name of the Thesis:	Improving the room acoustics in houses
Date:	15.11.2006
Number of pages:	75 + 8
Faculty:	Electrical and Communications Engineering
Professorship:	S-89 Acoustics and Audio Signal Processing
Supervisor:	Professor Matti Karjalainen
Instructor:	Lic.Sc.(Tech.) Jyrki Kilpikari
<p>This thesis is about improving the room acoustics in houses with high living room and that are constructed of stone. Some basic theory of the room and building acoustics is presented and criteria for good room acoustics are also considered. The SFS standard 5907 "Acoustic classification of spaces in buildings" is also presented separately.</p> <p>In the experimental part, three buildings are investigated. Reverbration time is measured in the living rooms and then acoustical improvements are designed and carried out. After that the new reverbration times are measured and the results are analyzed. Considering the results and the feedback from the people living in the house, the conditions are found to be clearly better than before.</p> <p>In general, the room acoustical conditions seem to be often bad in houses with high living room and that are constructed of stone. Reverbration and loudness are big problems and solutions are needed. Often the situation is that people don't know how to cope with the problem and what are the costs. Problems can be fixed afterwards, but they should be considered before building the house so that technically and visually better solutions could be possible.</p>	
Keywords: room acoustics, house, stone, reverbration time, living room, acoustical improvements, absorption, acoustic classification, sound insulation, home theater	

## ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty helmikuun ja joulukuun 2006 välisenä aikana Saint-Gobain Isover Oy:n ja Saint-Gobain Ecophon Oy:n Vantaan toimitiloissa, edellä mainittujen yritysten tilauksesta. Työn valvojana toimi professori Matti Karjalainen Teknillisen korkeakoulun Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion ja ohjaajana tekniikan lisensiaatti Jyrki Kilpikari Saint-Gobain Ecophon Oy:sta.

Kiitän ohjaajaa ja valvojaa hyvistä neuvoista, rakentavasta kritiikistä ja palautteesta työn suhteen. Samoin kiitos Jussi Jokiselle (Isover) ja Markku Hirvoselle (Ecophon) kaikesta avusta työn edetessä sekä Juha Ryyppölle (Isover) ja Simo Tuokolle (Ecophon), jotka olivat suuresti vaikuttamassa työn alkuunpanemisessa. Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy:sta haluan kiittää Mikko Kylliäistä hyvistä neuvoista ja käytännön avusta työn järjestelyissä sekä Jussi Rauhala ja Olli Paajasta mittausavusta. Kiitokset myös koko Ecophonin välle hyvän työilmapiirin luomisesta.

Suurin kiitos vanhemmilleni henkisestä ja taloudellisesta tuesta sekä kannustuksesta opiskelujen aikana.

Helsingissä 15.11.2006

Pekka Taina

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT OF THE MASTER´S THESIS</b> .....	<b>ii</b>
<b>ALKULAUSE</b> .....	<b>iii</b>
<b>SISÄLLYSLUETTELO</b> .....	<b>iv</b>
<b>LISTA KÄYTETYISTÄ SYMBOLEISTA</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTA KÄYTETYISTÄ LYHENTEISTÄ</b> .....	<b>viii</b>
<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Asuinrakennusten akustointi Suomessa.....	1
1.2 Työn sisältö.....	2
<b>2 HUONE- JA RAKENNUSAKUSTIIKKA</b> .....	<b>4</b>
2.1 Huoneakustiikka .....	4
2.1.1 Äänen heijastuminen.....	4
2.1.2 Jälkikaiunta-aika .....	7
2.1.3 Äänen absorptio .....	10
2.1.4 Materiaalit ja sijoittelu .....	11
2.1.5 Puheen ymmärrettävyys ja erotettavuus .....	13
2.2 Rakennusakustiikka .....	15
2.2.1 Ääniaaltojen kulkeutuminen rakennuksessa.....	16
2.2.2 Äänitaso rakennuksessa .....	17
2.2.3 Ilmaäänieristys .....	18
2.2.4 Askeläänieristävyys .....	22
2.2.5 Materiaalit ja rakenteet .....	24
2.3 Pientalon akustinen luokitus .....	26
2.4 Olohuone kuuntelutilana.....	27
2.4.1 Audiolaitteiden sijoittelu.....	27
2.4.2 Huoneen akustointi .....	28
<b>3 MITTAUSMETODIIKKA</b> .....	<b>30</b>
3.1 Yleistä .....	30
3.2 Jälkikaiunta-ajan mittaus .....	30
3.3 Äänitason mittaus .....	32

3.4	Ilmaaäni- ja askeläänieristyksen mittaus .....	33
3.5	STI:n, RASTI:n ja STIPA:n mittaus.....	34
<b>4</b>	<b>KOhteiden esittely .....</b>	<b>36</b>
4.1	Kohderakennusten tiedot .....	36
4.1.1	Kohde 1 .....	36
4.1.2	Kohde 2.....	36
4.1.3	Kohde 3.....	37
4.1.4	Ongelmien tarkastelua .....	38
4.2	Mittaukset .....	39
4.2.1	Laitteisto ja olosuhteet .....	39
4.2.2	Tulosten esikäsittely .....	40
4.2.3	Tulokset .....	40
4.2.4	Johtopäätökset.....	41
4.3	Moodien laskenta.....	41
<b>5</b>	<b>KOhteiden akustinen suunnittelu .....</b>	<b>44</b>
5.1	Tavoitteet .....	44
5.2	Pientalon akustinen luokitus .....	45
5.3	Akustointi.....	46
5.3.1	Kohde 1 .....	47
5.3.2	Kohde 2.....	49
5.3.3	Kohde 3.....	50
<b>6</b>	<b>Tulokset .....</b>	<b>52</b>
6.1	Uudet mittaustulokset .....	52
6.2	Asukkaiden havainnot.....	56
6.3	Tulosten arviointi.....	57
6.4	Jatkotoimenpiteet kohteissa .....	58
6.5	Jatkotutkimukset .....	59
<b>7</b>	<b>Yhteenveto .....</b>	<b>60</b>
	<b>LÄhteet .....</b>	<b>62</b>
	<b>LIITE A: Mitatut jälkikaiunta-ajat ennen parannuksia.....</b>	<b>65</b>
	<b>LIITE B: Mitatut jälkikaiunta-ajat parannusten jälkeen.....</b>	<b>69</b>
	<b>LIITE C: Kuvia asennetuista vaimennusmateriaaleista .....</b>	<b>73</b>

## LISTA KÄYTETYISTÄ SYMBOLEISTA

$a_k$	Huoneen pintojen keskimääräinen absorptiokerroin
$A$ [m <sup>2</sup> ]	Absorptioala
$A_0$ [m <sup>2</sup> ]	Referenssipinta-ala 10m <sup>2</sup>
$c$ [m/s]	Äänennopeus
$C$ [dB]	Spektrisovitusermi (ilmäänieristys)
$C_1$ [dB]	Spektrisovitusermi (askeläänieristys)
$C_{tr}$ [dB]	Spektrisovitusermi (ilmäänieristys)
$d_{min}$ [m]	Mittalaitteen ja lähteen välinen minimietäisyys jälkikaiunta-ajan mittauksessa
$E_g$ [J]	Katon pinnan suuntaisen kentän energia SEA-mallissa
$E_{ng}$ [J]	Muun kuin katon pinnan suuntaisen kentän energia SEA-mallissa
$f$ [Hz]	Taajuus
$f_m$ [Hz]	Modulaatiotaajuus
$f_s$ [Hz]	Schroeder-taajuus
$h(t), h(\tau)$	Järjestelmän impulssivaste
$k$ [1/m]	Ilman absorptiosta johtuva kerroin
$L_{A,eq}$ [dB]	Keskiäänitaso (ekvivalenttitaso)
$L_{A,max}$ [dB]	Enimmäisäänitaso
$L_E(t)$ [dB]	Huoneen energiatason funktio ajan suhteen SEA-mallissa
$L_n$ [dB]	Askeläänitaso
$L_p$ [dB]	Äänipainetaso
$L_{p,LVIS}$ [dB]	LVIS-laitteiden aiheuttama äänipainetaso
$L_{p,ON}$ [dB]	Kokonaisäänipainetaso LVIS-laitteiden ollessa päällä
$L_{p,OFF}$ [dB]	Kokonaisäänipainetaso LVIS-laitteiden ollessa pois päältä
$m(f, f_m)$	Modulaatiosiiirtofunktio
$n, N$	Kokonaisluku
$p, p(t)$ [Pa]	Paine
$p_0$ [Pa]	vertailuäänipaine = 20 $\mu$ Pa
$P_i$ [W]	Tutkittavaan rakenteeseen kohdistunut tuleva ääniteho
$P_r$ [W]	Heijastunut ääniteho
$P_t$ [W]	Rakenteesta läpimennyt ääniteho
$R$ [dB]	Ilmäänieristävyys
$R_{At,e}$ [dB]	Ilmäänieristävyysluku (Nord test, tieliikennemelu)



$R_{Av,e}$ [dB]	Ilmaäänieristävyyysluku (Nord test, muu kuin tieliikennemelu)
$R_w$ [dB]	Ilmaäänieristävyyysluku
$S$ [m <sup>2</sup> ]	Eristävän rakenteen kokonaispinta-ala
$S_i$ [m <sup>2</sup> ]	Tilassa olevan osapinnan ala
$S_T$ [m <sup>2</sup> ]	Huoneen pintojen yhteenlaskettu pinta-ala
$SNR_{app}$ [dB]	Näennäinen signaali-kohinasuhde
$SNR_f$ [dB]	Signaali-kohinasuhde taajuuskaistalla
$t$ [s]	Aika
$T$ [s]	Ajanjakso mittauksessa
$T_{60}$ [s]	Jälkikaiunta-aika, eli aika jossa äänienergia laskee 60dB
$T_E$ [s]	Eyringin kaavalla laskettu jälkikaiunta-aika
$T_f$ [s]	Jälkikaiunta-aika taajuuskaistalla
$T_s$ [s]	Sabinen kaavalla laskettu jälkikaiunta-aika
$V$ [m <sup>3</sup> ]	Tilavuus
$w_k$	Oktaavikaistakohtainen painotuskerroin STI:n laskennassa
$y(t)$	Vaimeneva vaste Schroederin menetelmässä
$\alpha_i$	Pinnan absorptiosuhde
$\lambda$ [m]	Aallonpituus
$\eta', \eta''$	Kytkehäviökerroin SEA-mallissa
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Tiheys
$\tau$	Integroitivakio Schroederin menetelmässä

## LISTA KÄYTETYISTÄ LYHENTEISTÄ

A	A-taajuuspainotus
F	Fast-aikapainotus
IEC	Sähköalan kansainvälinen standardoimisjärjestö (International Electrotechnical Commission)
ISO	Kansainvälinen standardoimisjärjestö (International Organization for Standardization)
KP	Kaiutinpaikka
LVIS	Lämpö, Vesi, Ilma, Sähkö
MLS	Maksimipituusjono (Maximum Length Sequences)
MTF	Modulaarisiirtofunktio (Modular Transfer Function)
NTP	Normaalilämpötila ja -paine (Normal Temperature and Pressure)
RASTI	Nopea STI (Rapid Speech Transmission Index)
RIL	Suomen Rakennusinsinöörien Liitto
SEA	Tilastollinen energia-analyysi (Statistical Energy Analysis)
SFS	Suomen Standardoimisliitto
SNR	Signaali-kohinasuhde (Signal to Noise Ratio)
STI	Puheensirtoindeksi (Speech Transmission Index)
STIPA	Puheensirtoindeksi PA-järjestelmille (Speech Transmission Index for Public Address Systems)

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Asuinrakennusten akustointi Suomessa

Asuinrakennusten huoneakustiikan ja äänieristyksen merkitys ihmisille on kasvanut viime vuosikymmeninä huomasti. Ulkoa kantautuvan melun määrä on moninkertaistunut autojen määrän, tiheämmän kaavoituksen sekä teollisuuden lisääntyessä. Naapurihuoneistoista sekä –huoneista kantautuva melu taas on kasvanut mm. lisääntyneen kodinelektroniikan myötä. Tämä on merkinnyt suurempaa tarvetta äänen eristämiseksi.

Sisätilojen huoneakustiset ominaisuudet pientaloissa ja niiden olohuoneissa saattavat olla hyvinkin huonot. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi pitkää jälkikaiunta-aikaa, voimakkaita yksittäisiä huonemoodeja tai suhteellisen korkeaa melutasoa. Ongelmaan liittyen on tehty perustutkimusta, mutta siihen ei ole ollut olemassa juuri minkäänlaisia julkisen hallinnon antamia ohjeita määräyksistä puhumattakaan. Kuitenkin nyt kalliiden kotiteattereiden yleistyessä sekä ihmisten tietoisuuden ja vaatimustason lisääntyessä on myös kodin huoneakustisiin ominaisuuksiin alettu kiinnittää yhä enemmän huomiota. Kodilta haetaan tänä päivänä yhä enemmän laatua ja rauhaa muualla koettavan kiireen, stressin ja melun vastapainoksi. Ihmisiä on alkanut kiinnostaa yhä enemmän valmiiden asuntojen ääniolosuhteiden parantaminen ja rakenteilla olevien asuntojen saaminen hyväksi akustiikaltaan [1].

Työ- ja toimistotiloja on akustoitu jo vuosia, mutta asuintiloihin, joissa ihminen kuitenkin yleensä viettää suurimman osan ajastaan, ei ääniolosuhteiden parannuksia juurikaan ole tehty. Asuinrakennuksissa äänieristysominaisuuksia selkeinä lukuarvoina ei oltu aiemmin vaadittu lainkaan, kunnes 1967 Suomen rakennusinsinöörien liitto julkaisi ääneneristysnormit, joiden noudattamista rakennusvalvonta ryhtyi pian vaatimaan. 1970-luvulla alettiin antamaan erilaisia viranomaismääräyksiä äänieristyksestä sekä meluntorjunnasta, ja vuosikymmenen puolivälissä määräykset koottiin sittemmin päivitettyksi Suomen rakennusmääräyskokoelmaksi [2]. Kokoelman C1-osassa [3] esitettiin määräykset äänieristyksestä ja äänitasoista rakennuksissa. Aluksi määräykset koskivat asuinrakennuksia, majoitusliikkeitä, sairaaloita, toimistorakennuksia ja teollisuuden työhuoneita. 1985 määräyksiä uusittiin ja mukaan tulivat koulut ja päiväkodit.

Määräykset koskevat asuinrakennusten osalta lähes yksinomaan äänieristystä ja

äänitasoja, eivätkä ne ota kunnolla kantaa huoneakustiikkaan. Vuonna 2004 Suomen standardoimisliitto julkaisi standardin SFS 5907 Rakennusten akustinen luokitus [4]. Standardia valmistelleessa työryhmässä oli mukana akustiikan alan konsulttitoimistojen, tutkimuslaitosten ja materiaalivalmistajien edustajia. Tämä standardi ottaa eristyksen ja äänitasojen lisäksi kantaa myös asuinrakennusten huoneakustiikkaan erilaisten ohjeiden ja ohjearvojen muodossa. Standardi ei ole määräys, mutta se on hyvä suositus, ja sillä voidaan luokitella rakennuksia tai niissä olevia tiloja akustisesti eri luokkiin. Akustinen luokitus standardin perusteella on hyvä tapa ilmaista rakennuksen akustisia ominaisuuksia sellaiselle ihmiselle, jolle jälkikaiunta-ajat sekä äänitasot yms. eivät kerro mitään. Tällä tavalla asuntoa hankkivat ihmiset voivat helposti vaatia laatua ilman syvempää tietämystä alasta.

## **1.2 Työn sisältö**

Tämän päivän rakennusalalla on rakennuttajien ja muiden kentällä liikkuvien tahojen kiinnostus julkisten ja yksityisten tilojen akustisiin ominaisuuksiin kasvanut kysynnän myötä. Käsillä oleva työ esitelee nykyään suosiossa olevien, korkean olohuoneen omaavien kivitalojen huoneakustiikan parantamiseen liittyviä asioita. Diplomityön tarkoituksena on antaa sekä teoreettista että käytäntöön liittyvää tietoa siitä, miten ääni käyttäytyy rakennuksessa ja miten huoneakustisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa. Myös äänieristystä ja siihen vaikuttavia tekijöitä tarkastellaan.

Tämän lisäksi työssä tarkastellaan pientalon standardinmukaista akustista luokittelua ja pohditaan standardissa olevien suositusten huomioimista rakennusvaiheessa. Termistöä, mittalukuja sekä niiden tavoitearvoja ja mittaustapa- ja menetelmiä käydään läpi olennaisilta osin. Koska em. standardikaan ei ota kantaa pientalon huoneakustiikkaan, ja kuitenkin esimerkiksi jälkikaiunta-ajalla on asumismukavuuden kannalta merkitystä, tarkastellaan työssä aihetta soveltaen muita suosituksia.

Työn puitteissa tutkitaan kolmea kohdetta, jotka kaikki ovat kahitiilirunkoisia, korkean olohuoneen omaavia pientaloja Tampereella ja sen läheisyydessä. Kohteissa mitataan olohuoneen jälkikaiunta-aika, suunnitellaan akustiikan parannus, toteutetaan suunnitelma ja mitataan uudestaan. Yhdessä kohteessa vaimennusmateriaalia on asennettu jo aiemminkin, mutta sielläkin tehdään vielä pieniä parannuksia.

Kirjallisuuskatsaus aiheesta esitetään luvussa kaksi. Kyseisessä luvussa tarkastellaan työssä käytettäviä huone- ja rakennusakustiikan termejä. Termien fysikaalinen perusta ja olennaisimmat matemaattiset johdot käydään läpi. Tämän lisäksi luvussa tarkastellaan standardinmukaisen rakennusten akustisen luokituksen soveltamista pientaloihin sekä esitetään pieni katsaus käytännön tasolla olohuoneiden akustointiin ja kaiuttimien sijoitteluun. Mittausmetodiikkaa käsitellään luvussa kolme. Siinä esitellään aiemmin läpi käytyjen akustisten suureiden mittaukseen liittyviä asioita käytännön ja teorian tasolla. Kohteita ja niiden ongelmia sekä mittaustuloksia esitellään luvussa neljä. Taloihin tehtäviä parannuksia suunnitellaan luvussa viisi, jossa myös esitellään pientalon akustisen A-luokituksen kriteerit. Parannusten jälkeisiä mittaustuloksia ja muita havaintoja esitellään ja tarkastellaan luvussa kuusi. Samassa luvussa pohditaan myös mahdollisia jatkotoimenpiteitä. Yhteenveto tehdään luvussa seitsemän.

Työn painopiste on huoneakustiikan puolella. Rakennusakustiikkaakin käydään läpi eristämisen osalta, mutta koska siihen ei kohderakennuksissa pystytä vaikuttamaan ja koska se on muutenkin osapuolilla jo ennestään paremmin hallussa, sen käsittely jätetään teoriatasolle. Työssä nojataan vahvasti erilaisiin huone- ja rakennusakustiikkaan liittyviin standardeihin. Mittaukset ja laskenta tehdään standardien mukaan, jotta myös tulokset olisivat vertailukelpoisia. Tärkeimpiä osia standardeista käydään läpi myös tässä dokumentissa, mutta jokaista yksityiskohtaa ei erikseen esitellä.

## 2 HUONE- JA RAKENNUSAKUSTIIKAA

Tässä kappaleessa esitellään huone- ja rakennusakustiikan termejä ja käsitteitä. Niiden fysikaalisia ominaisuuksia ja matemaattisia johdantoja käydään tarpeen mukaan läpi. Aluksi tarkastellaan huoneen äänikenttää sekä sen käyttäytymistä, ja tämän jälkeen laajennetaan näkökulmaa tarkastelemalla äänen kulkeutumista rakennuksen sisälle ja eri huoneiden välillä. Käsittely tehdään mahdollisimman ymmärrettävästi eikä tarkoitus ole pureutua ilmiöihin akustisen kenttäteorian kautta lähtien aaltoyhtälöstä. Myöhemmin esitellään rakennusten akustiseen luokitteluun käytettävää standardia [4] ja sen soveltamista pientaloihin, jonka jälkeen lopuksi vielä tarkastellaan olohuoneen toimintaa kuuntelutilana käytännönläheisestä näkökulmasta.

### 2.1 Huoneakustiikka

Huoneessa äänikenttään vaikuttaa moni asia. Osittain tai kokonaan suljetussa tilassa, jossa seinämät eivät absorboi ääntä täysin, tilan muodot vaikuttavat kenttään. Tällöin tilassa on kuultavissa äänilähteestä tulevan suoran äänen lisäksi heijastuksia. Huoneen akustiikan hyvyydelle on olemassa monia subjektiivisia ja objektiivisia mittoja. Äänikenttä voi luoda tilasta tarkoitustaan vastaavan ja miellyttävän, tai vastaavasti epämiellyttävän tai jopa sietämättömän.

Tässä luvussa esitellään huoneakustiikkaan liittyvää teoriaa ja laskentaa. Luvussa käydään läpi äänen käyttäytymistä huoneessa, heijastuksia, kaiuntaa, absorptiota sekä absorptiomateriaaleja ja niiden sijoittelua. Luvun lopussa kerrotaan myös hiukan puheen erotettavuudesta ja sen tunnusluvuista.

#### 2.1.1 Äänen heijastuminen

Ääniaallon osuessa kovaan pintaan, osa siitä heijastuu ja osa absorboituu. Heijastunut osa jatkaa matkaansa ja osuu pian toiseen pintaan, jossa tapahtuu sama ilmiö. Kun huoneessa on kaksi toistensa suuntaista pintaa, joista ääni heijastuu, syntyy niiden väliin voimakas seisova aalto, jos pintojen välinen etäisyys on aallonpituuden puolikas. Ilmiötä kutsutaan ominaisvärähtelyksi [5]. Ominaisvärähtelyjä, eli moodeja, voi syntyä myös muille taajuuksille. Tällöin pintojen välin on oltava puolikkaan aallonpituuden kokonaislukumonikerta. Otetaan aallonpituuden  $\lambda$ , taajuuden  $f$  ja äänennopeuden  $c$  perusriippuvuus

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (1)$$

Merkitään pintojen väliä  $l_p$  seuraavasti

$$l_p = n \frac{\lambda}{2}, \quad (2)$$

eli pintojen välinen etäisyys on nyt muodostuvan moodin aallonpituuden puolikkaan monikerta. Edellisistä saadaan pintojen välille syntyvien moodien taajuudet

$$f = n \frac{c}{2l_p}, \quad (3)$$

jossa  $n$  on kokonaisluku. Tämä kaava pätee ainoastaan kahden vastakkain asetetun, samansuuntaisen pinnan väliin syntyville moodeille.

Huonemoodit ovat huoneissa syntyviä seisovia aaltoja. Tavallisessa suorakulmion muotoisessa huoneessa on kuusi suoraa pintaa, jotka ovat pareittain samansuuntaisia ja pintaparien väliset kulmat ovat suoria. Tällöin moodeja syntyy useammalla tavalla. Edellisessä tapauksessa moodi syntyi kahden pinnan välille. Tällaista yksiulotteista moodia kutsutaan aksiaaliseksi moodiksi (*axial mode*). Kun pintoja on useampia, syntyy moodeja muillakin tavoilla. Tangentiaaliseksi moodiksi (*tangential mode*) kutsutaan seisovaa aaltoa, joka syntyy neljän pinnan välille. Molempien pintaparien välille syntyy seisova aalto, jolloin syntyvä summa-aalto kulkee neljän eri pinnan kautta. Tällöin siis liikutaan kahdessa dimensiossa. Vinoa moodeja (*oblique mode*) syntyy kolmessa dimensiossa, eli kun ääniaalto kulkee kaikkien kuuden pinnan kautta. [6].

Huoneeseen syntyviä ominaistajuuksia voidaan laskea yleisellä, Rayleighin vuonna 1869 esittämällä kaavalla

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2} + \frac{r^2}{H^2}}, \quad (4)$$

jossa  $L$ ,  $W$  ja  $H$  ovat huoneen dimensiot [m] ja  $p$ ,  $q$  ja  $r$  ovat kokonaislukuja, jotka kuvaavat monennenko asteen ja missä dimensiossa moodi on. Vastaavasti moodeja merkitäänkin kolmella numerolla, esimerkiksi  $f(0,0,1)$ . Kaavasta voidaan huomata, että se suppenee kahden pinnan väliin syntyvien moodien

laskentakaavaksi, jos se muunnetaan yhteen dimensioon asettamalla kaksi vakioista  $L$ ,  $W$  ja  $H$  nolllaksi. Tässä kaavassa oletuksena on, että huoneen muoto noudattelee suorakulmaisen särmiön muotoja. Näin ei kuitenkaan aina ole, vaan varsinkin nykyaikana rakentamisessa suositetaan vinoja kattoja ja muutenkin hieman tavallisuudesta poikkeavia muotoja. Siinä tapauksessa mitään yleisempää kaavaa huonemoodien laskennalle ei ole, vaan voidaan ainoastaan tarkastella erikseen yhdensuuntaisia ja vastakkaisia pintoja, joiden väliin seisova aalto voisi syntyä ja laskea niiden väliin mahdollisesti muodostuvia aksiaalisia moodeja.

Jotta huone ei voimakkaasti vaikuttaisi kuunneltavan äänen spektriin, ominaistaajuuksia tulisi olla mahdollisimman tiheässä [7]. Tarkastelemalla huonemoodien laskentaa voidaan huomata, että mooditiheys kasvaa taajuuden kasvaessa. Moodien laskennassa ja tarkastelussa siten riittää, että tarkastellaan erillisiä moodeja pienillä taajuuksilla – ns. Schroeder-taajuuden alapuolella. Se lasketaan seuraavalla tavalla.

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (5)$$

Kaavassa  $T_{60}$  on huoneen jälkikaiunta-aika ja  $V$  tilavuus. Schroeder-taajuus on rajataajuus, jonka alapuolella mooditiheys on niin pieni, että moodit erottuvat selkeästi toisistaan.

Mooditiheys pienillä taajuuksilla voi muodostua ongelmaksi nimenomaan pienissä huoneissa. Jotta yksittäiset moodit eivät korostuisi liikaa pienillä taajuuksilla, on syytä suunnitella huoneen mitat niin, etteivät ne ole toistensa kokonaislukumonikertoja. Erilaisia moodeja esiintyy huoneiden lisäksi myös kiinteissä kappaleissa, jotka sopivalla herätteellä alkavat värähtelemään ominaistaajuuksillaan. Kun energiahäviöt ovat pieniä, on ilmiö selvästi havaittavissa.

Kovien vastakkaisten pintojen välille syntyy myös helposti tärykaikua. Mahdollinen tärykaiku havaitaan nopeina, perättäisinä, vaimenevina kaikuina äänen kimpoillessa kahden tai useamman pinnan välillä. Tärykaiun syntyä rakennukseen tekovaiheessa on melko mahdotonta ennustaa täysin, mutta sen ehkäisemiseksi voidaan tehdä toimenpiteitä esimerkiksi diffusoreilla tai absorptiomateriaaleilla tai tekemällä pieniä kallistuksia seiniin, jolloin vastakkaiset pinnat eivät ole täysin samansuuntaisia [8].

Diffusorit ovat satunnaisesti epätasaisia pintoja. Kun ääniaalto osuu tällaiseen



pintaan, se heijastuu moneen suuntaan. Tällöin tärykaikuja ei pääse muodostumaan. Valmiita diffusoreja on saatavilla, mutta niitä voidaan myös suunnitella ja valmistaa itse tilakohtaisesti. Diffusorin itse valmistamisessa on se hyvä puoli, että siten se voidaan suunnitella tilaan paremmin sopivaksi, vaikkapa taideteokseksi. Myös kaikissa huoneessa olevissa kovissa kalusteissa, valaisimissa, putkissa ja koriste-esineissä yms. tapahtuu heijastuksia ja diffraktiota. Oma äänikenttää diffusoiva vaikutuksensa on myös epätasaisilla pinnoilla, kuten esimerkiksi tiiliseinillä.

Ääniaallon kulkiessa huoneessa, jossa on epätasaisia pintoja ja muita diffusoivia esineitä, se hajooa heijastuksessa useammaksi aalloksi. Monien heijastusten ja aaltojen hajotessa syntyy suljetussa tilassa nopeasti äänikenttä, joka voidaan olettaa diffuusiksi laskentaa varten. Tämä oletus ei täysin pidä paikkaansa, mutta se on kelvollinen approksimaatio kentästä ja välttämätön perusolettamus monelle tässä dokumentissa käytetylle kaavalle. Diffuusissa äänikentässä on määritelmän mukaan ääretön määrä tasaisesti joka suunnasta saapuvia tasoaltoja, jotka eivät korreloi keskenään. Tällöin energia ei keskimäärin virtaa mihinkään suuntaan, joten akustinen intensiteetti on nolla [9].

### 2.1.2 Jälkikaiunta-aika

Kun huoneessa oleva äänilähde sammutetaan, vaimenee huoneen äänikenttä kuulumattomiin väliaineen ja pinnoilla tapahtuvien heijastusten häviöistä johtuen. Huoneella on siis jokin jälkikaiunta-aika.

Jälkikaiunta-aika määritellään aikaväliksi, joka kuluu äänilähteen sammuttamisen ja sen hetken välillä, kun äänienergia on vaimentunut miljoonasosaan alkuperäisestä eli 60 dB [9]. Jälkikaiunta-aika vaihtelee taajuuden funktiona, joten sen esittäminen ja laskenta tehdään taajuuskaistoittain. Mittayksikön käyttöönotajan, W. C. Sabine'n empiirisesti kehittämä kaava jälkikaiunta-ajan laskemiselle on

$$T_{60} = \frac{0,16V}{A} . \quad (6)$$

Kaavassa  $V$  on huoneen tilavuus ja  $A$  on huoneen kokonaisabsorptioala, joka määritellään seuraavasti.

$$A = \sum_i S_i \alpha_i \quad (7)$$

Kaavassa  $S_i$  on yksi huoneen pinta ja  $\alpha_i$  on pinnan suhteellinen kyky absorboida ääntä, eli absorptiosuhde. Absorptiosuhde määritellään pintaan kohdistuneen äänitehon  $P_i$  ja heijastuneen äänitehon  $P_r$  erotuksen suhteena kohdistuvaan äänitehoon

$$\alpha = \frac{P_i - P_r}{P_i} \quad (8)$$

ja se voidaan mitata eri materiaaleille käyttäen kaiuntahuonemenetelmää tai impedanssiputkea [9]. Eri materiaalien absorptiosuhteita löytyy kirjallisuudesta taulukoituna. [10]

Vaihtoehtoinen laskukaava jälkikaiunta-ajalle on nk. Eyringin kaava

$$T_E = \frac{0,16V}{4kV - S_T \ln(1 - a_k)} \quad (9)$$

Kaavassa  $V$  on tilavuus niinkuin edellä. Muista muuttujista  $S_T$  on huoneen pintojen yhteenlaskettu pinta-ala,  $k$  on ilman absorptiosta johtuva kerroin, joka riippuu taajuudesta sekä ilmankosteudesta, ja  $a_k$  on huoneen pintojen keskimääräinen absorptiokerroin [11]

$$a_k = \frac{\sum_i S_i \alpha_i}{\sum_i S_i} = \frac{A}{S_T} \quad (10)$$

Kaava tuottaa tarkemman tuloksen kuin Sabinen kaava, mutta sen laskenta on työläämpää. Sabinen ja Eyringin kaavojen välillä on likimääräinen riippuvuus

$$T_S - T_E \approx 1,4 \cdot 10^{-2} \sqrt[3]{V} \quad (11)$$

Tätä kaavaa käytetäänkin usein korjaamaan Sabinen kaavalla saatua jälkikaiunta-ajan arvoa [5].

Viimeisimmän ehdotuksen metodiksi jälkikaiunta-ajan laskemiselle esittivät Nilsson, Andersson ja Chigot tänä vuonna Eurooise 2006-tapahtuman yhteydessä [12]. Heidän mallinsa on tarkoitettu nimenomaan huoneeseen, jonka kattoon on asennettu absorptiomateriaalia äänikenttää parantamaan. Tämä onkin nykyään alati yleistymässä oleva tilanne julkisissa rakennuksissa, kuten kouluissa

ja sairaaloissa. Motivaationa ratkaisuun on ollut havainto siitä, että edellä kuvatus kaltaisissa tiloissa Sabinein kaava (6) antaa liian pieniä arvoja jälkikaiunta-ajalle.

Uudessa mallissa äänikenttä on teorian mukaan syytä jakaa kahteen osaan: katon pinnan suuntaiseen (*grazing*) sekä eri suuntaiseen (*non-grazing*) komponenttiin. Eri suuntainen komponentti osuu kentässä kulkiessaan suoraan absorptiomateriaaliin, jolloin se vaimenee normaalisti. Katon pinnan suuntainen komponentti taas ei suoraan osu absorbenttiin ellei se ensin osu ääntä hajottaviin kohteisiin, joka aiheuttaa ääniaallon suunnanmuutoksen ja sitä kautta kulkeutumisen absorbenttiin. Täten voidaan siis olettaa, että jälkikaiunta-aikaan vaikuttavat huoneessa absorptiopinnan lisäksi diffuusiivien objektien määrä. Objektien vaikutusta voidaan estimoida SEA-mallin (*Statistical Energy Analysis*, Tilastollinen energia-analyysi) avulla ajattelemalla kentän komponentit kahdeksi tilaksi ja kuvaamalla diffuusiointia tilojen välisellä kytkentähäviökertoimella. Tällöin voidaan muodostaa yhtälö huoneessa olevan energiatason  $L_E(t)$  laskulle.

$$L_E(t) = 10 \log(E_{ng} e^{-2\pi f \eta' t} + E_g e^{-2\pi f \eta'' t}) \quad (12)$$

Kaavassa  $E_{ng}$  kuvaa eri suuntaisen ja  $E_g$  katon suuntaisen komponentin energiaa. Muista muuttujista  $t$  on aika,  $f$  taajuus ja  $\eta'$  sekä  $\eta''$  kytkentähäviökertoimet.

Formulointi uudessa metodissa on seuraavanlainen. Lähtökohtaisesti oletetaan, että huoneen energiatason yhtälössä (12) määräävänä terminä on jälkimmäinen, katon pinnan suuntainen komponentti. Täten huoneen jälkikaiunta-aikaa otetaan kuvaamaan ns. kaksiulotteisen kentän Sabinein kaava (13), koska pinnan suuntainen kenttä on kahdessa dimensiossa.

$$T_{60,2dim} = 0,128 \frac{V}{A} \quad (13)$$

Kaavassa on  $V$  on huoneen tilavuus ja  $A$  absorptioala, joka määritellään tässä

$$A = A_{g,ceiling} + A_{sc} + A_{walls} + A_{air} . \quad (14)$$

Tässä  $A_{g,ceiling}$  on katon absorptiomateriaalin absorptioala oletuksella, että ääniaalto saapuu materiaaliin häviävän pienessä kulmassa. Termiin sisältyy myös lattian absorptio samalla oletuksella ja sen oletetaan olevan hyvin pieni. Termi saadaan laskettua tekemällä mitattauksia kaiuntahuoneessa ensin ilman ääntä hajottavia esineitä ja sitten niiden kanssa.  $A_{sc}$  kuvaa katon suuntaisesta kentästä eri

suuntaiseen kenttään diffusion takia vuotavaa energiaa. Toiseen suuntaan vuotava energia jätetään huomiotta. Myös  $A_{sc}$  voidaan laskea samalla tavalla kuin  $A_{g,ceiling}$ .  $A_{walls}$  on seinien absorptioala ja  $A_{air}$  on ilman aiheuttama häviö.

Em. periaatteella on omat hyvät ja huonot puolensa. Mittaustuloksiin verratessa huomataan, että tälläkään tavalla ei päästä laskennallisesti aivan tarkkaan tulokseen, mutta 250 Hz:n yläpuolella kuitenkin – ainakin kyseisessä kokeessa – selkeästi lähemmäs kuin Sabine kaavalla. Menetelmä ei vaikuta sopivan hyvin pientalojen laskentaan, sillä  $A_{sc}$ :n määrittäminen joka kohteessa erikseen on varsin työlästä verrattuna saavutettuun hyötyyn. Sen sijaan kouluissa ja sairaaloissa, joissa usein on melko samantyylinen kalustus, ei termiä tarvitse määrittää joka kerralla erikseen, jolloin työmäärä vähenee huomattavasti.

Edellä käsiteltyjen tapojen lisäksi myös muita kaavoja ja menetelmiä jälkikäiunta-ajan määrittämiseen on olemassa, mutta niihin ei syvennytä tämän enempää.

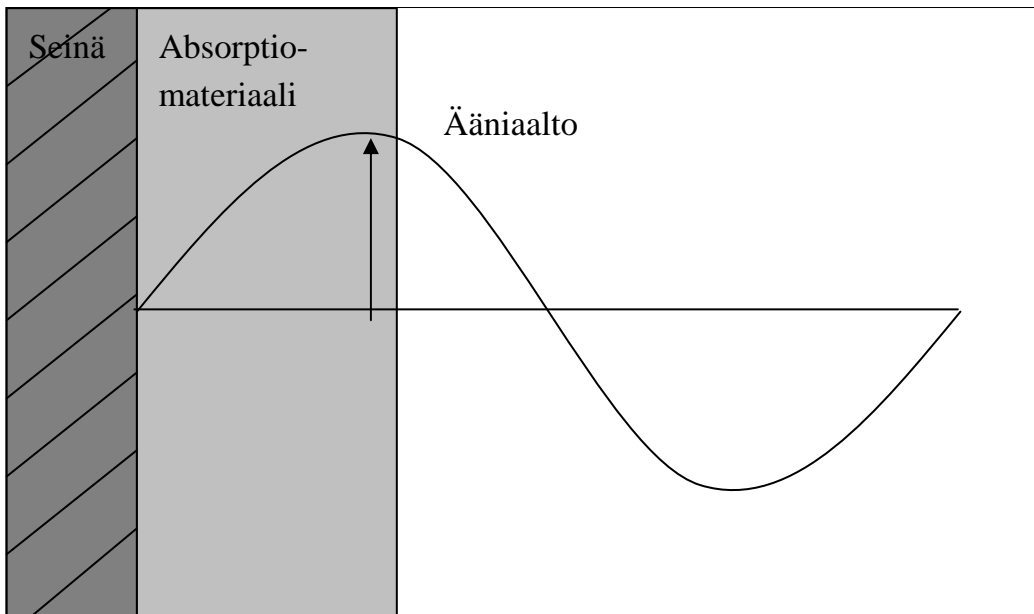
### 2.1.3 Äänen absorptio

Äänen absorptio perustuu energiahäviöihin absorbentissa. Suurilla taajuuksilla ilmamolekyylit liikkuvat huokoisessa materiaalissa, jolloin vastustavana voimana toimii kitkavoima. Aaltoliikkeen häviöitä syntyy myös virtausten suunnanmuutoksissa sekä niiden kulkiessa epäsäännöllisten huokosten läpi [11].

Koska äänen absorptio perustuu molekyylien liikkeeseen absorbentissa, kannattaa absorptiomateriaali (esimerkiksi akustiikkalevy) sijoittaa vaimennuksen maksimoimiseksi siten, että muodostuvan, seisovan aaltoliikkeen maksimihiukkasnopeus on sen sisällä.

Akustisen kenttäteorian peruslakien mukaan akustiikan perussuureet hiukkasnopeus  $\bar{u}$  ja äänipaine  $p$  ovat toisistaan riippuvaisia. Kun aaltoliike heijastuu kovasta pinnasta (takana oleva seinä), on hiukkasnopeus pinnalla minimissä ja paine maksimissa. Paine on minimissä ja hiukkasnopeus maksimissa seisovan aallon kuvun eli neljännesaallon kohdalla. Tämä tarkoittaa pienillä taajuuksilla varsin suurta etäisyyttä seinästä. Esimerkiksi 50 Hz:llä aallonpituus  $\lambda \approx 6,9$  m (1) ja neljäsosa siitä on noin 1,7 m (NTP:ssä). Tällaisten paksuuksien käyttäminen pientaloissa ei kuitenkaan ole mielekäästä. Sen sijaan esimerkiksi taajuudella  $f = 500$  Hz saadaan  $\lambda = 0,69$  m ja neljäsosa siitä on enää 17 cm. Luonnollisestikin lasketun perustaaajuuden lisäksi myös kaikkien suuremman taajuuden omaavien aaltojen neljännesaaltokuvut osuvat seinässä kiinni olevan

absorbentin sisään, jolloin myös ne vaimentuvat hyvin.



**Kuva 2.1** *Seisovan aallon osuminen seinään, jossa liimattuna absorptiomateriaalia*

Myös laskettua rajataajuutta pienemmät taajuudet vaimentuvat, vaikka neljännesaaltokupu ei olekaan vaimennusmateriaalin sisällä. Hyvää vaimennusta saadaan jo silloin, kun vaimennusmateriaalin paksuus on kymmenesosa aallonpituudesta.

#### 2.1.4 Materiaalit ja sijoittelu

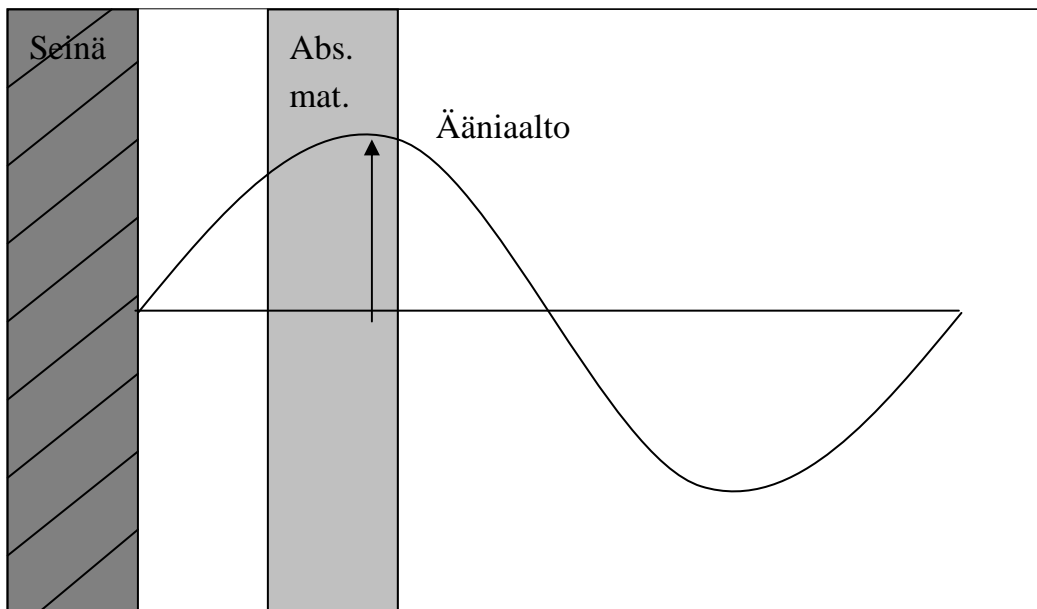
Voimakkaasti ääntä vaimentavia verhouksia on kolmea päätyyppiä: huokoiset aineet, levyresonaattorit ja Helmholtz-resonaattorit [5]. Huukoisia materiaaleja käytetään pääasiassa korkeampien, yli 250 Hz äänten vaimennukseen. Ne vaimentavat jonkin verran myös pienempiä taajuuksia, mutta parempi vaimennus siellä saadaan aikaan erilaisilla resonaattoreilla. Kaupallisia tuotteita huukoisista materiaaleista löytyy suhteellisen hyvin, mutta pienten taajuuksien vaimentamiseen käytettävät ratkaisut tehdään yleensä tapauskohtaisesti. Kaupalliset huokoiset materiaalit ovat yleensä mineraalivillasta valmistettuja, sopivasti käsiteltyjä levyjä, joille on mitattu absorptiokäyrät, ja ne on luokiteltu standardin EN ISO 11654 mukaan luokkiin A-E [13].

Pienillä, alle 250 Hz taajuuksilla, on yleensä ongelmia, jos huoneen jälkikaiunta-aika on siellä pitkä. Siihen voi vaikuttaa hieman huukoisilla seinämateriaaleilla, resonaattorinomaisesti toimivilla sisäseinäratkaisuilla sekä erikseen tilaan suunnitelluilla resonaattoreilla. Levytetyille seinille voidaan laskea

resonanssitaajuuksia, ja jos levytys tehdään sopivasti niin, että levyjen kiinnityskohdat ovat oikealla etäisyydellä toisistaan sekä levyn takana on absorboivaa materiaalia, esimerkiksi mineraalivillaa, voidaan rakenteella vaimentaa alataajuuksia huomattavasti. Laskentaa ei kuitenkaan harrasteta yleisesti, vaan levyjen kiinnitykset tehdään muilla perusteilla. Mitoittamattomillakin levyseinillä saadaan silti parempi vaimennus kuin kovilla kiviseinillä.

Vaimennusmateriaalin määrän lisäksi sijoittelu vaikuttaa myös suuresti huoneen äänikenttään. Helpoin ratkaisu on yleensä laittaa kaikki materiaali kattoon, jossa se on poissa tieltä. Osittain ratkaisu toimiikin, mutta ei kokonaan. Seinien välisten tärykaikujen ja moodien sekä nk. biljardipalloheijastumisen takia on syytä laittaa osa materiaalista seiniin. Jos halutaan vaimentaa jotain huoneessa olevaa äänilähdettä, kuten esimerkiksi videotykkiä tms., kannattaa osa materiaalista sijoittaa kyseisen laitteen taakse seinälle, jolloin lähteestä seinään kohdistunut äänen säteily ei heijastu eteenpäin [8].

Jos ei haluta käyttää paksuja akustiikkalevyjä, mutta halutaan silti päästä hyvään äänenvaimennukseen matalammillakin taajuuksilla, voidaan akustiikkalevyn ja taustapinnan väliin jättää ilmaväli. Tällöin levyn häviötä aiheuttava rakenne saadaan kauemmas seinämästä, ja myös pienemmillä taajuuksilla neljännesaaltokuvut osuvat siihen, jolloin vaimennus lisääntyy.



**Kuva 2.2** Akustiikkalevy ilmavälillä

Teoriassa ongelmana tässä tapauksessa on se, että sopivan taajuuden omaavan

komponentin puoliaallon kohdalla oleva solmu osuu nyt vaimennusmateriaalin sisään, ja jos levy on kovin ohut, on vaimennus tällä taajuudella paljon huonompaa kuin muilla. Käytännössä ongelmaa ei kuitenkaan ole, sillä normaalissa äänikentässä ääni tulee eri kulmista seinäpintaan, jolloin vaimennusmateriaalin efektiivinen etäisyys taustasta vaihtelee, ja vaimennusta saadaan kaikille taajuuksille.

Myös huoneen kalustus vaikuttaa huoneen akustiikkaan. Paksut ja pehmeät sohvot, sängyt sekä muut kalusteet absorboivat ääniaaltoja melko hyvin, kun taas kovat rakenteet heijastavat niitä. Matot ja verhot vähentävät heijastuksia lattiasta ja ikkunoista, jolloin huoneen jälkikaiunta-aika ja äänekkyys laskee. Paksujen verhojen vaikutus voi olla kohtuullisen suurikin huoneissa, joiden seinäpinta-alasta suuri osa on ikkunaa, koska lasin absorptiokerroin on erittäin pieni varsinkin suurilla taajuuksilla.

Hyvin ääntä absorboivissa tiloissa, joissa jälkikaiunta-aika on pieni, on myös pienempi rakennuksen ulkopuolisen äänilähteen aiheuttama äänitaso kuin samanlaisella eristyksellä toteutetussa, vähemmän absorboivassa huoneessa. Eli koska seinät absorboivat äänienergiaa, pienenee huoneen äänikentän energia luonnollisesti samalla. Vaimennusmateriaalin sijoittaminen huoneistoon vaikuttaa jonkin verran myös rakennusfysikaalisiin ominaisuuksiin, kuten kosteuspisteen sijaintiin, joten se on syytä ottaa huomioon asennuspaikkaa miettiessä.

### *2.1.5 Puheen ymmärrettävyys ja erotettavuus*

Toimistoissa, kouluissa ja auditorioissa yms. on tärkeää, että puheesta saadaan tapauskohtaisesti joko mahdollisimman hyvin tai mahdollisimman huonosti selvää. Puheen ymmärrettävyyden käsite viittaa yleisesti siihen, kuinka hyvin puheviestin merkitys menee perille kuulijalle. Se riippuu puheen tuottajasta, siirtokanavasta sekä vastaanottajasta ja täten se siis on subjektiivinen käsite. Puheen erotettavuus taas kuvaa enemmän erilaisten merkityksettömien tavujen erotettavuutta tilassa. On löydettävissä erilaisia objektiivisia mittoja, jotka korreloivat näihin käsitteisiin. Niistä käytetyimpiä ovat STI ja RASTI [14], [15]. Seuraavassa esitellään muutamia näistä mitoista sekä niiden määritelmiä.

STI (*Speech Transmission Index*, Puheensiirtoindeksi) on luku, joka esittää karkeasti puheen siirron laatua tavuerotettavuuden kannalta. Se kuvastaa puheen ymmärrettävyyttä ja erotettavuutta tilassa. Se määritetään standardin IEC 60268-16 [16] mukaan ja se voi vaihdella välillä 0...1. Arvo 1 kertoo täydellisestä ja 0

olemattomasta tavuerotettavuudesta. Indeksiin vaikuttavat mm. taustamelun taso, puhujan äänitaso, tilan jälkikaiunta-aika, etäisyys puhujan ja kuulijan välillä sekä puhujan suuntaavuus.

STIPA (*Speech Transmission Index for Public Address Systems*) on saman IEC-standardin määrittelemä kuin STI. STIPA-metodissa tehdyt yksinkertaistukset avaavat mahdollisuuden eri taajuuskaistojen samanaikaiseen, rinnakkaiseen prosessointiin. Tämä lyhentää huomattavasti vaadittavaa mittausaikaa ja tekee menetelmästä täten kenttäolosuhteissa kätevä. STIPA-menetelmällä mitatut tulokset korreloivat erittäin hyvin STI:n kanssa [17], joten sen käyttö on perusteltua varsinkin silloin, kun mittaukset ovat vain suuntaa antavia.

RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) on hyvin samankaltainen STI:n kanssa, mutta se mitataan pienemmällä määrällä taajuuskaistoja ja modulaatiotaajuuksia ja siten se tuottaa hieman erilaisia arvoja. RASTI:n mittaustuloksen ero STI:n mittaustulokseen kuitenkin riippuu paljolti olosuhteista, ja joskus se saattaa olla erittäin hyväkin kuvaus puheen ymmärrettävyydelle ja erotettavuudelle. STI on kuitenkin yleisesti suositellumpi mittayksikkö, sillä se ottaa koko puheen kannalta olennaisen taajuusalueen huomioon.

STI:n laskentaa varten määritellään ns. modulaatiosiirtofunktio (*modulation transfer function*, MTF). Se kuvaa sitä, kuinka signaalin taajuuskaistoittain laskettu verhoikäyrämodulaatio säilyy tai muuttuu lähteestä vastaanottajalle [18]. Tulos merkitsee alenemaa (prosentteina) alkuperäisestä modulaatioasteesta, ja se saadaan laskettua lausekkeesta

$$m(f, f_m) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2\pi f_m \frac{T_f}{13,8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-SNR_f/10}}. \quad (15)$$

Kaavassa  $f$  on oktaavikaistan taajuus,  $f_m$  on modulaatiotaajuus,  $T_f$  on oktaavikaistakohtainen jälkikaiunta-aika ja  $SNR_f$  on vastaavan kaistan signaali-kohinasuhde (*Signal to Noise Ratio*). Kaava on kahdessa osassa, joista ensimmäinen ilmoittaa jälkikaiunnan ja toinen osa taustamelun vaikutuksen tulokseen.

Edellisestä funktiosta saadaan siis kaistoittain laskettuna tulokset kullekin modulaatiotaajuuden ja taajuuskaistan arvoyhdistelmälle. Nämä  $m$ -arvot muunnetaan näennäisiksi SNR-suhteiksi,  $SNR_{app}$  kaavalla



$$SNR_{\text{app}} = 10 \lg \frac{m}{1-m}, \quad (16)$$

jossa tulokset saadaan desibeleinä. Saaduista suhteista lasketaan painotettu keskiarvo (17), joka saadaan painottamalla puheen erotettavuuden kannalta tärkeimpiä taajuuskaistoja.

$$\overline{SNR}_{\text{app}} = \sum_{k=1}^7 w_k SNR_{\text{app},k} \quad (17)$$

Kaavassa  $w_k$  on oktaavikaistakohtainen painotuskerroin. Kertoimille on tutkimusten [19] perusteella saatu arvot  $w_1 = 0,129$ ;  $w_2 = 0,143$ ;  $w_3 = 0,114$ ;  $w_4 = 0,114$ ;  $w_5 = 0,186$ ;  $w_6 = 0,171$ ;  $w_7 = 0,143$ . Saatu keskiarvo muunnetaan takaisin m-arvoksi, joka on etsitty STI-arvo. Laskennassa tulee ottaa huomioon seuraavat säännöt (18) ja (19).

$$STI = 1, \text{ kun } SNR_{\text{app}} \geq 15 \text{ dB kaikille m-arvoille} \quad (18)$$

$$STI = 0, \text{ kun } SNR_{\text{app}} \leq -15 \text{ dB kaikille m-arvoille} \quad (19)$$

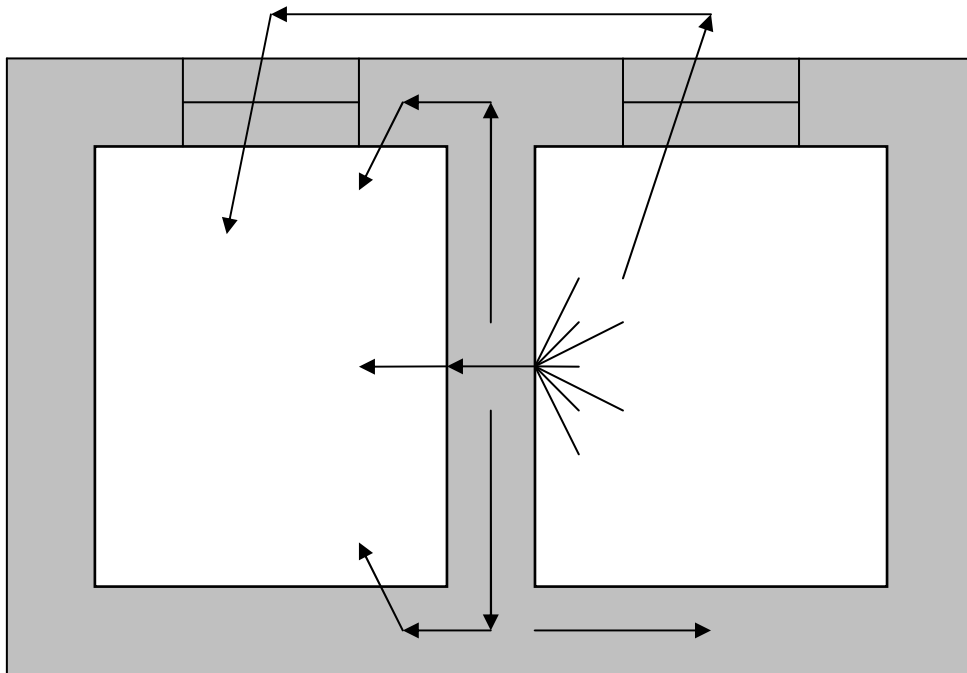
Huoneakustiikkaan liittyy monia muitakin tunnuslukuja lähinnä saliakustiikan puolella. Niitä sekä niiden mittaamiseen liittyviä asioita käsitellään tarkemmin muussa kirjallisuudessa, esimerkiksi Timo Peltosen vuonna 2000 tekemässä diplomityössä ”A Multichannel Measurement System for Room Acoustics Analysis” [20].

## 2.2 Rakennusakustiikka

Tässä luvussa laajennetaan äänen tarkastelua yksittäisestä huoneesta koko rakennukseen ja sen ulkopuolelle. Luvussa käsitellään ääniaaltojen kulkeutumista ulkoa rakennuksen sisälle sekä rakennuksessa huoneiden välillä. Tähän liittyen puhutaan myös äänieristyksestä erilaisin materiaalein ja rakenteellisin ratkaisuin. Työssä ei mitata rakenteiden eristävyksiä eikä eri äänitasoja, mutta aihetta käsitellään silti teoriassa, koska se on olennainen osa asuintalojen akustiikkaa sekä käytännön asumismukavuuden, että standardinmukaisen akustisen luokittelun kannalta.

### 2.2.1 Ääniaaltojen kulkeutuminen rakennuksessa

Ääni voi välittyä lähteestä vastaanottopisteeseen monin tavoin ja monia eri reittejä pitkin. Se kykenee siirtymään sekä ilmassa paineen vaihteluna, että rakenteissa mekaanisena värähtelynä. Ääni pystyy kytkeytymään rajapinnoilla ilmasta rakenteeseen ja toisinpäin. Tällä tavoin esimerkiksi puheen synnyttämä paineenvaihtelu huoneilmassa kytkeytyy seiniin ja saa ne värähtelemään. Värähtely siirtyy rakenteita pitkin toisiin huoneisiin, jos siirtymätietä ei ole katkaistu. Toisiin huoneisiin siirtynyt seinien värähtely saa jälleen aikaan huoneilmassa paineenvaihtelua, joka taas havaitaan äänenä. Siirtyminen voi tapahtua tilojen välissä olevan seinärakenteen läpi tai ns. sivutiesiirtymänä molempia huonetiloja sivuavan rakenteen kautta. Molemmat ovat merkittäviä ilmiöitä. Samalla tavalla lattialla kävely saa lattian värähtelemään, ja se taas aiheuttaa ilmassa paineenvaihtelua, jolloin askeleet kuullaan äänenä. Lattian värähtely siirtyy huoneesta ja kerroksesta toiseen helposti rakenteissa ja saa aikaan paineenvaihteluita eli ääntä muissa huoneissa.



**Kuva 2.3** Äänen etenemisreittejä, iskun kohdistuessa rakenteeseen

Ääniaallon edetessä ilmassa, tapahtuu aina energiahäviöitä, joten erittäin kaikuvassakin tilassa värähtely lakkaa aina ajan myötä. Ilmassa energiaa kuluu kitkan vastustukseen. Äänen luonnollinen vaimeneminen ilmassa on kuitenkin varsin pientä. Se on taajuusriippuvaista ja sen suuruusluokka on n. 0,001...0,1

dB/m. Energiahäviöitä tapahtuu myös rakenteessa liikkuvassa värähtelyssä sekä hetkellä, jolloin ääniaalto kytkeytyy rakenteeseen. Rajapinnalla osa äänestä heijastuu takaisin huoneilmaan, osa kytkeytyy rakenteeseen ja osa kuluu kitkan johdosta lämmöksi.

### 2.2.2 Äänitaso rakennuksessa

Keskiäänitaso (ekvivalenttitaso)  $L_{A,eq}$  (dB) on jatkuva vakioäänitaso, jonka tehollisarvo on sama kuin vaihtelevan äänitason tehollisarvo määritetyllä ajanjaksolla. Se määritellään seuraavasti:

$$L_{eq} = 10 \lg \frac{1}{T} \int_T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt = 20 \lg \sqrt{\frac{1}{T} \int_T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt} . \quad (20)$$

Kaavassa  $T$  on mitattavan ajanjakson pituus,  $t$  on aika,  $p$  on mitattava paine ja  $p_0$  on standardoitu referenssipaine 20  $\mu\text{Pa}$ .

Enimmäisäänitaso (A-painotettu)  $L_{A,max}$  (dB) on tarkasteluajanjaksona esiintynyt voimakkuudeltaan korkein äänitaso määritellyllä aikapainotuksella. Ellei toisin erikseen mainita, tarkoitetaan aikapainotusta  $F$  (*fast*) [4].

Melualueille rakennettavien asuin- ja liikerakennusten julkisivun äänieristysvaatimukset annetaan useimmiten kaavoitusvaiheessa. Vaatimuksilla pyritään varmistamaan, ettei ulkomelun aiheuttama äänitaso rakennuksen sisällä ylitä asuin- ja toimistotilojen ohjearvoa. Kaavoituksessa julkisivun äänieristävyysvaatimukset annetaan yksinkertaisina A-äänitasoeroituksina, käyttäen lähtötietoina rakennuksen ulkopuolella arvioitua melutasoa ja sisäpuolella sallittua melutason ohjearvoa [21]. Valtioneuvoston päätöksen 993/1992 [2], [22] mukaan rakennuksen ulkopuolisen äänilähteen aiheuttamat äänitasojen enimmäisarvot asuintiloissa ovat päiväsaikaan  $L_{A,eq,7-22} = 35$  dB ja yöaikaan  $L_{A,eq,22-7} = 30$  dB. Tämä vastaa standardissa SFS 5907 luokkaa C. A- ja B-luokalle on asetettu tiukemmat vaatimukset.

Myös rakennuksessa itsessään syntyy melua. Melua tuottavat LVIS-laitteet, eli ilmastointilaitteet, lämmityslaitteet, vesi- ja viemärintilaitteet yms. Näiden tuottamalle äänelle on erikseen olemassa standardinmukaiset äänitasorajat  $L_{A,eq,T}$  ja  $L_{A,max}$ .

### 2.2.3 Ilmaäänieristys

Ilmaäänieristävyys on huonetiloja erottavan rakenteen kyky eristää äänilähteestä ilman välityksellä ympäristöön kantautuvaa ääntä. Ääni etenee huonetilasta toiseen monia reittejä, esimerkiksi ilmateitse (jos huonetilojen välissä on aukko), seinärakenteen läpi tai sivutiesiirtymänä. Ilmaäänieristävydessä ei oteta kantaa siihen, mitä kautta ääni siirtyy, vaan ainoastaan siihen, kuinka suuri osa toisessa huonetilassa syntyneestä äänestä siirtyy toiseen huonetilaan.

Yleiskäsitettä äänieristys vastaa fysikaalinen suure äänieristävyys. Se on sama suure kuin läpäisyvaimennus, jonka täsmällinen määritelmä on

$$R = 10 \lg \frac{P_i}{P_t}, \quad (21)$$

missä  $P_i$  on tutkittavaan rakenteeseen kohdistunut tuleva ääniteho ja  $P_t$  on läpimennyt teho. Äänieristävydestä käytetään myös joskus nimeä reduktioluku. Kun ääniteho kohdistuu rakenteeseen ilmanpaineen vaihteluna, eikä rakenteessa kiinni olevan värähtelijän kautta, kutsumme laskettavaa eristävyyttä ilmaäänieristävyudeksi. Rakenteeseen kohdistuvan sekä läpäisevän äänitehon mittaaminen on vaikeaa, mutta ilmaäänieristävyys voidaan mitata ilman tehon mittaamistakin käyttäen hyväksi äänipainetasoa, jonka määritelmä on

$$L_p = 10 \lg \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \lg \frac{P}{P_0}. \quad (22)$$

Kun tarkastellaan ilmaäänieristävyuden kaavaa (21) ja sijoitetaan siihen paineen paikkakeskiarvon sisältävä tulevan äänitehon lauseke

$$P_i = \frac{\langle p_1^2 \rangle}{4\rho c} S, \quad (23)$$

jossa  $\rho$  on tiheys,  $c$  on äänennopeus ja  $S$  on eristävän rakenteen pinta-ala, sekä läpimenneen äänitehon lauseke

$$P_t = \frac{\langle p_2^2 \rangle}{4\rho c} A, \quad (24)$$

jossa  $A$  on vastaanottohuoneen absorptioala, saadaan ilmaäänieristävyydelle

$$R = 10 \lg \left( \frac{\langle p_1^2 \rangle S}{\langle p_2^2 \rangle A} \right). \quad (25)$$

Nyt kun korvataan paineiden neliöiden paikkakeskiarvot vastaavilla keskimääräisillä äänipainetasoilla, saadaan ilmaäänieristävyydelle

$$R = L_1 - L_2 + \lg \frac{S}{A}, \quad (26)$$

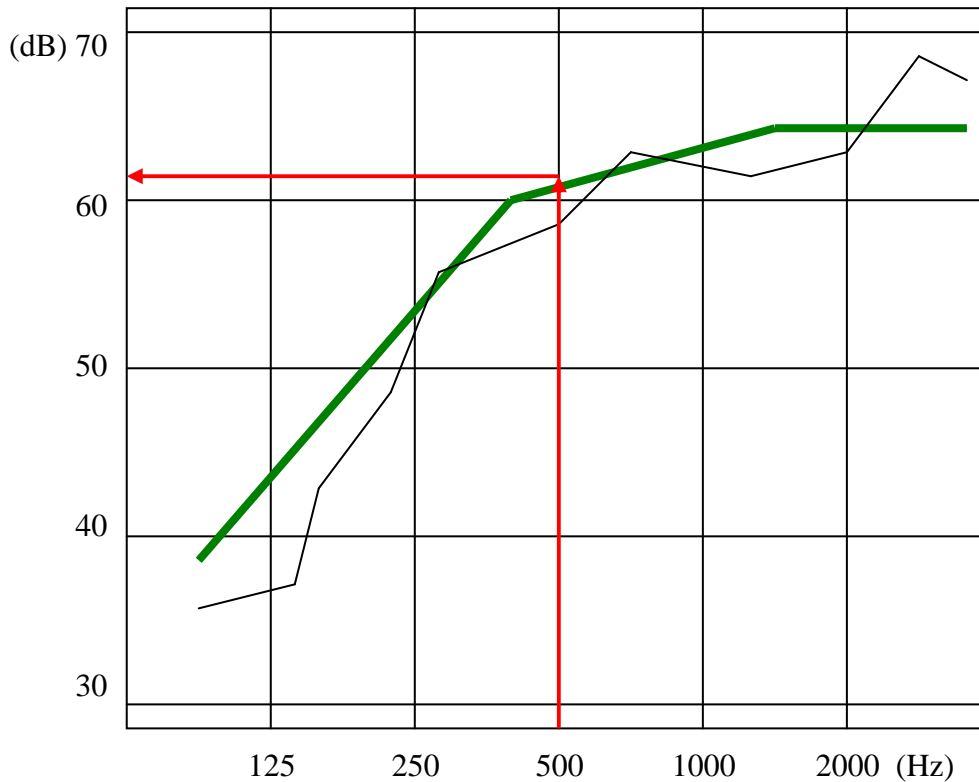
Jos  $A$  vielä korvataan Sabinen kaavasta (6) saadulla lausekkeella, saadaan ilmaäänieristävyyden lauseke muotoon

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg S - 10 \lg \left( 0,161 \frac{V}{T_{60}} \right), \quad (27)$$

jossa on pelkästään mitattavia suureita. Saadussa kaavassa oletetaan, että mittaukset tehdään kahdessa, mitattavalla eristerakenteella kytketyssä, kaiuntahuoneessa, jolloin äänen siirtyminen tapahtuu (lähes) puhtaasti pelkästään mitattavan rakenteen läpi [9].

Asuinrakennuksissa huoneistojen ja huoneiden äänieristyksessä torjuttavan melun lähteenä on yleensä toinen ihminen. Ihmisäänen analyysista voidaan huomata, että ääni sisältää runsaasti keskikorkeita ääneksiä, mutta matalilla ja korkeilla alueilla on äänienergiaa suhteellisen vähän. Jos tämän lisäksi otetaan huomioon korvan kuulokyvyn herkkyys eri taajuuksilla, voidaan piirtää käyrä, joka ilmoittaa kullakin taajuusalueella tarvittavan eristävyyden [5]. Tällä perusteella on muodostettu standardisoitu vertailukäyrä, johon vertaamalla voidaan äänieristystä kuvata yhdellä luvulla.

Standardin ISO 717 mukainen ilmaäänieristysluku kuvaa kahden tilan välistä ilmaäänieristävyyttä ja se saadaan vertailemalla taajuuskaistoittain mitattua ilmaäänieristävyyttä standardoituun vertailukäyrään [23]. Vertailukäyrä sovitetaan mitattuun ilmaäänieristävyyteen, jonka jälkeen sovitetulta käyrältä luetaan 500 Hz:n kohdalta lukema, joka on kysytty ilmaäänieristävyyysluku. Suurempi ilmaäänieristysluku kertoo paremmasta ilmaäänieristyksestä. Laboratorio-oloissa mitatun ilmaäänieristysluvun merkintä on  $R_W(\text{dB})$  ja rakennuksessa mitatun  $R'_W(\text{dB})$ .



**Kuva 2.4** ISO –standardin mukaisen ilmääänieristyslusun määrittäminen ilmääänieristävyysmittaustuloksesta. Kuvassa paksu viiva on standardoitu vertailukäyrä ja ohut viiva mitattu ilmääänieristävyys

Vertailukäyrän täydennykseksi on otettu käyttöön vielä erilliset spektrisovitustermit. Termit on suunniteltu erilaisia melulähteitä vastaan. Standardinmukaisia (ISO) spektrisovitustermejä on kahdenlaisia ja ne ovat merkinnöiltään  $C$  ja  $C_{tr}$ . Molempiin voidaan lisätä alaindeksi käytetyn taajuusalueen mukaan.

Melulähdetyypit, joihin sovelletaan termiä  $C$ , ovat asumistoimet (puhe, musiikki, radio, tv), lasten leikkiminen, raideliikenne keski- ja suurilla nopeuksilla, moottoriteliikenne  $> 80$  km/h, lentoliikenne suihkukoneilla (lyhyet etäisyydet), sekä tehtaot, joiden päästöt ovat etupäässä keski- tai suuritaajuisia melua. Melulähdetyypit, joihin sovelletaan termiä  $C_{tr}$ , ovat tieliikenne taajamassa, raideliikenne pienillä nopeuksilla, lentoliikenne potkurikoneilla, lentoliikenne suihkukoneilla (suuret etäisyydet), diskomusiikki sekä tehtaot, joiden päästöt ovat etupäässä pieni- ja keskitaajuisia melua.

ISO-standardissa ilmääänieristysvaatimukset ilmoitetaan pienimpinä sallittuina ilmääänieristyslukuina  $R'_w$  tai ilmääänieristyslusun ja spektrisovitustermin (esim.  $C_{50-3150}$ ) summan arvoina ( $R'_w + C_{50-3150}$ ) [24], [4].

Summa voidaan laskea seuraavasti:

$$R'_w + C_{50-3150} = -10 \lg \sum_{i=1}^j 10^{(L_i - R_i)/10} \quad (28)$$

Kaavassa  $i$  on taajuuskaistojen indeksi ( $j$  kpl, määrä riippuu taajuusalueesta),  $R_i$  on taajuuskaistakohtainen ilmastieristävyyden arvo ja  $L_i$  on standardissa olevasta äänitasospektrin taulukosta otettu arvo. Termin  $C_{tr}$  laskentaan voidaan käyttää edellä annettua kaavaa (28) siten, että ainoastaan termi  $L_i$  saa erilaisia arvoja. Myös termin  $C_{tr}$  laskentaan käytetyt  $L_i$  arvot on taulukoitu standardiin ISO 717-1 [23].

Vanhoista rakenteista on olemassa mittaustuloksia, jotka on ilmoitettu hieman eri tavalla kuin ISO-standardin mukaisesti. Näitä Nord test-periaatteen mukaisia arvoja ( $R_{At,e}$  ja  $R_{Av,e}$ ) voidaan kuitenkin merkityksettömän pienen eroavaisuuden vuoksi approksimoida ISO-standardin mukaisilla yksiköillä seuraavasti.

$$R_w + C_{tr} \approx R_{At,e} \quad (29)$$

$$R_w + C = R_{Av,e} \quad (30)$$

Edellisistä yhtälöistä ensimmäinen on tarkka approksimaatio ja jälkimmäinen on eksakti [24], [25].

Rakennuksissa käytetyille seinärakenteille on annettu teoreettiset ilmastieristysluvut, jotka on laskettu rakenteen ominaisuuksien mukaan tai mitattu laboratorio-olosuhteissa. Laskentaan ja mitoitukseen on olemassa kirjallisuudessa kaavoja ja menetelmiä, mutta tässä työssä jätämme ne käsittelemättä ja tyydymme mittaustuloksiin.

Laboratorio-olosuhteissa mitatun ilmastieristysluvun hajonta on noin  $\pm 1 \dots \pm 2$  dB ja kentällä hieman huonompi [24]. Kentällä ei kuitenkaan yleensä päästä samoihin tuloksiin kuin laboratoriossa, johtuen mm. sivutiesiirtymästä ja huonosta tiiviydestä. Kentämittausten tulokset voivat olla ovilla 2...10 dB ja seinillä jopa 10...15 dB huonompia kuin laboratoriomittausten [4]. Tämä otetaan huomioon rakennusvaiheessa, koska standardit ja määräykset koskevat nimenomaan kentämittaustuloksia.

#### 2.2.4 Askeläänieristävyys

Askeläänellä tarkoitetaan muihin tiloihin kuuluvaa runkoääntä, jonka aiheuttaa esimerkiksi kulkeminen lattialla tai portaissa tai raskaiden esineiden siirtely. Sen mittauksissa herätteenä käytetään standardoitua askeläänikojetta. Askeläänikojeen tarkoituksena on tuottaa edellä mainitun kaltaista runkoääntä lattiapintaa koputtamalla.

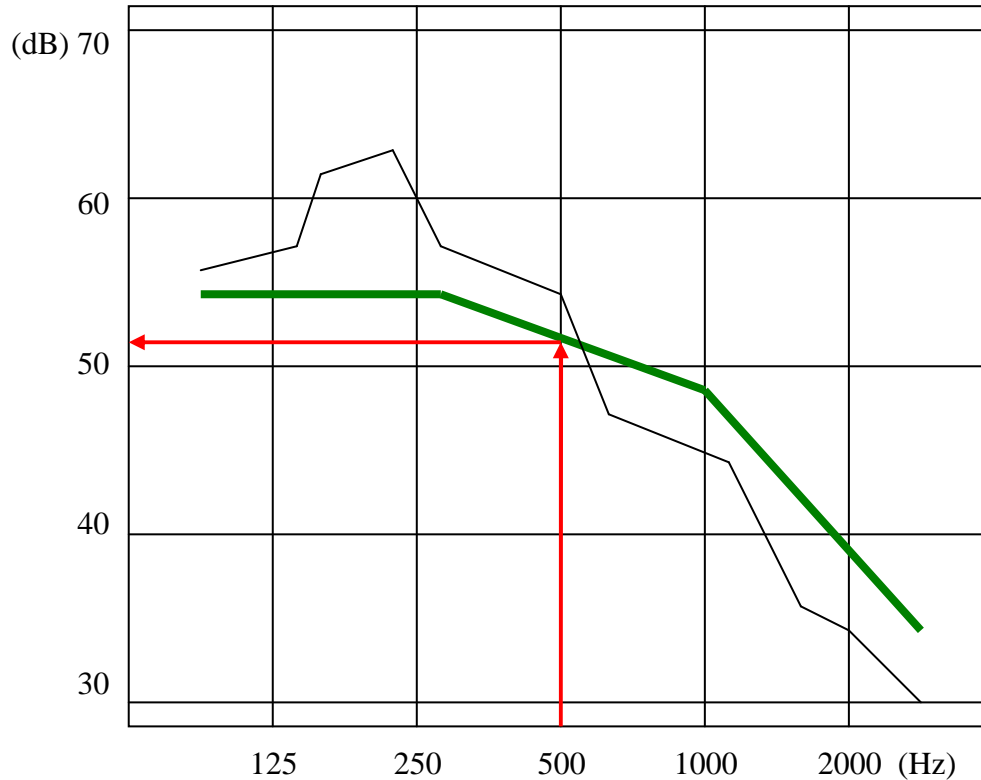
Askeläänieristykseen merkitys on erityisen suuri esimerkiksi kerrostaloissa, joissa asuinhuoneistoja on päällekkäin. Asumismukavuuden kannalta on erittäin tärkeää, että yläpuolella olevasta huoneistosta ei kuulu esimerkiksi naapurin normaali kävely. Askeläänieristävyuden määrittäminen tehdään eräänlaisena normalisoituna äänipainetasomittauksena. Se määritellään tasoyhtälönä

$$L_n = L_2 + 10 \lg \frac{A}{A_0}, \quad (31)$$

jossa  $L_2$  on vastaanottohuoneessa mitattu paineen neliön paikkakeskiarvon taso ja  $A_0$  on referenssipinta-ala  $10 \text{ m}^2$ . Selityksenä oudolle pinta-alan vertailuarvolle on se, että tavallisen kokoisessa asuinhuoneessa näin muodostettu tehotaso saa suunnilleen samoja lukuarvoja kuin raaka keskimääräinen äänipainetaso [9].

Terssikaistoittain (100-3150 Hz) mitattu  $L_n$  on siis askeläänitaso. Askeläänitasoluku saadaan askeläänitasosta samaan tapaan kuin ilmaäänieristävyysluku ilmaäänieristävyydestä, eli sovitetaan standardin ISO 717-2 vertailukäyrä taajuuskaistoittain mitattuun askeläänitasoon, jonka jälkeen tulos luetaan 500 Hz:n kohdalta [26]. Laboratorio-olosuhteissa mitatun askeläänitasoluvun merkintä on  $L_{n,w}$  (dB) ja rakennuksessa mitatun  $L'_{n,w}$  (dB). Pienempi askeläänitasoluku kertoo paremmasta askeläänieristyksestä.





**Kuva 2.5** ISO –standardin mukaisen askeläänitasoluvun määrittäminen mitatusta askeläänitasosta. Kuvassa paksu viiva on standardoitu vertailukäyrä ja ohut viiva mitattu askeläänitaso.

Samaan tapaan kuin ilmaäänieristyksessä on myös askeläänitasoluvun määrittämisessä otettu apuun spektrisovitustermit painottamaan tyypillisestä kävelystä aiheutuvan meluspektrin ominaisuuksia. Askeläänen tapauksessa termin merkintä on  $C_1$  ja sen alaindeksiin voidaan liittää informaatio käytettävästä taajuusalueesta. Kentällä mitatut spektrisovitustermit lasketaan mitatuista normalisoiduista askeläänitasoista  $L'_{n,i}$  sekä askeläänitasoluvusta  $L'_{n,w}$  seuraavasti

$$C_1 = 10 \lg \sum_{i=1}^j 10^{L'_{n,i}/10} - 15 - L'_{n,w} \quad (32)$$

Kaavassa  $j$  on laskennassa käytettävien taajuuskaistojen lukumäärä. Spektrisovitustermi  $C_1$  lasketaan taajuuskaistoittain välillä 100-2500 Hz, mikäli alaindeksissä ei ole lisämerkintöjä. Sen mittausta voidaan myös laajentaa alemmille taajuuksille, jotka ovat itseasiassa askeläänen kannalta merkittäviä. Jos laskennassa mukana ovat kaistat 50 Hz, 63 Hz ja 80 Hz, merkintä on  $C_{1,50-2500}$ . Mitatut spektrisovitustermit ilmoitetaan standardin mukaan askeläänitasoluvun kanssa seuraavasti:  $L'_{n,w} (C_1; C_{1,50-2500})$ , eli esimerkiksi 49 (1;3) dB. Kansallisissa

standardeissa asuntojen väliset askeläänieristysvaatimukset ilmoitetaan usein myös askeläänitasoluvun ja spektrisovitustermin summana.

Tutkimusten mukaan spektrisovitustermin  $C_{1,50,2500}$  käyttö askeläänieristykseen arvioinnissa tuottaa 17 prosenttiyksikköä korkeamman korrelaation asukkaiden subjektiivisten käsitysten kanssa kuin askelääniluku  $L'_{n,w}$  [27]. Myös muissa tutkimuksissa on todettu termien sopivan hyvin nimenomaan Suomessa laajasti käytettävien välipohjaratkaisujen arvioimiseen [28]. Eli termien käyttö on perusteltua. Myös pienten taajuuksien (50, 63 ja 80Hz) huomioiminen on järkevää, vaikka niiden mittausepävarmuus onkin suurempi kuin muiden [29]. Jos ajatellaan ihmisen lattialla kävelyn tuottamaa ääntä ja sen spektriä, voidaan todeta, että se on painottunut nimenomaan pienemmille taajuuksille. Myös eristyksessä suurimmat ongelmat ovat nimenomaan pienten taajuuksien kanssa.

### 2.2.5 Materiaalit ja rakenteet

Äänieristykseen toteuttamiseen asuinrakennuksissa on olemassa monia tapoja. Suorin tapa olisi rakentaa mahdollisimman massiivisia ja paksuja rakenteita, jotka toimivatkin hyvin, mutta koska raskaat rakenteet eivät aina ole paras ratkaisu, ja koska rakentamisessa on huomioitava äänen lisäksi muitakin seikkoja kuten kestävyys, lämmöneristys, tiiviys, kantavuus jne, on muitakin tapoja kehitetty. Erilaisten rakenteiden eristävyys määrittämiseen teoriassa on olemassa menetelmiä ja laskukaavoja, mutta ne jätetään tämän työn ulkopuolelle ja tyydytään käsittelemään asioita pintapuolisesti. Yksittäisen seinän ominaisuuksien lisäksi on huomioitava, että pelkästään yksi hyvä seinä ei estä ääntä kulkeutumasta tilasta toiseen, jos muu toteutus on tehty huonosti. Seuraavassa onkin tarkoitus hieman sivuta erilaisten rakenteiden ja materiaalien vaikutusta ääneen etenemiseen.

Talonrakennuksessa suositetaan perinteisesti kaksinkertaisia seinärakenteita, jotka ovat huomattavan tehokkaita sekä äänen- että lämmöneristyksessä verrattuna yksinkertaiseen rakenteeseen. Kaksinkertaisen seinärakenteen muodostaa kaksi tiivistä, toisistaan erillä olevaa seinämää, joiden välissä on ilmatila. Rakenne toimii akustisesti siten, että äänipaine aiheuttaa toiseen seinäpuoliskoon heiladusliikkeen, joka siirtyy välissä olevan ilmajousen kautta toiseen seinäpuoliskoon. Välittyminen on sitä heikompaa, mitä pehmeämpi ilmajousi on, ts. mitä suurempi ilmaväli on. Jos jousijärjestelmään lisätään kitkaa synnyttävää materiaalia, paranee eristävyys ja resonanssien vaikutukset pienenevät. Tapana onkin ollut laittaa kaksinkertaisen seinän sisään villaa, joka lämmöneristeenä

toimimisen lisäksi absorboi tehokkaasti myös ääntä. Kaksinkertaisissa levyrakenteissa villan lisäyksen vaikutus äänieristävyyteen on 5...10 dB. Myös kaikenlaiset raskaat rakenteet, kuten betonilaatat ja tiiliseinät eristävät ääntä tehokkaasti. Nyrkkisääntönä on, että seinän massan kaksinkertaistaminen antaa 6 dB:n lisäyksen eristävyyteen [24].

Erilaisilla rakenneratkaisuilla voidaan myös vaikuttaa äänieristykseen paljon. Asuntojen ilma- ja askeläänieristävyydellä mitataan ennenkaikkea rakenteen ominaisuuksia eikä niinkään yhden seinän ominaisuuksia. Kelluvilla rakenteilla pystytään tehokkaasti eristämään rakenteiden kautta kulkevaa värähtelyä ja sitä kautta askelääntä. Myös muunlaiset äänen siirtymisreittien katkaisut ovat hyviä ratkaisuja. Esimerkiksi kahta huonetta sivuavan seinän katkaiseminen tai toisessa huoneessa lisäseinärakenteen käyttäminen estää tehokkaasti sivutiesiirtymänä kulkevan äänen eristykseen. Rakenneratkaisuja on lukemattomia ja niitä on tarkemmin esitelty mm. Suomen rakennusinsinöörien liiton julkaisussa ”RIL 129 Ääneneristyksen toteuttaminen” [24].

Jos eristäminen tehdään muutoin huolella ja hyvin, mutta rakenteeseen jää pienikin rako esimerkiksi ikkunan saumaan tai oven kynnyksen ja oven väliin, huonontuu eristys merkittävästi. Pienikin rako vastaa monen desibelin muutosta äänieristyksessä ja siksi kaikki saumat rakenteissa on tehtävä huolella. Toisin kuin standardi [4], rakennusmääräyskokoelma [3] ei vaadi mittauksia todisteeksi rakenteiden eristävyydestä ja siksi rakentajan huolimattomuudesta johtuvaa huonoa eristystä ei välttämättä noteerata, jos asukas itse ei puutu siihen [30].

Rakentaessa kannattaa siis muistaa, että mikäli käyttää muuhun äänieristykseen huomattavasti rahaa, niin ei kannata tinkiä hyvälaatuisista ovista, ikkunoista ja kynnyksistä. Hyvät rakenteetkaan eivät pidä muualta tulevaa ääntä loitolla, jos oven alla on senttimetrin ilmarako. Äänieristyksen kannalta tärkeää on myös pyrkiä estämään muodostuvaa ääntä, jolloin eristettävää on vähemmän. Ulkona olevalle melulle ei voida juurikaan mitään. Korkeintaan tieltä tulevaa liikennemelua voidaan estää meluvalleilla tai valitsemalla rakennuspaikka hyvin. Talon sisällä olevia melulähteitä sen sijaan voidaan hallita. Jos talossa on esimerkiksi ilmastointilaitteita tai lämminvesipumppuja tms, voidaan niiden tuottamaa melua hallita vähentämällä koneen tuottamia iskuääniä, tasapainottamalla konetta, vähentämällä liikkuvien osien välistä kitkaa ja eristämällä koneen tärisevät osat tai koko kone [31].

### 2.3 Pientalon akustinen luokitus

Seuraavassa esitellään standardinmukaista [4] pientalojen akustista luokitusta. Standardi siis jakaa rakennukset tai niiden osat akustisiin luokkiin niiden ominaisuuksien perusteella. Luokat A ja B ovat tiukimpia vaatimustensa puolesta (A on tiukin). Niissä määritellään tavoitteita tavanomaista paremman asumismukavuuden saavuttamiseksi akustiikan osalta. Luokka D on lievin, ja sitä sovelletaan vain olemassaoleviin vanhoihin rakennuksiin, joiden rakennusaikana ei ole ollut lukuarvoina annettuja äänieristysmääräyksiä, ja joissa on vähemmän tyydyttävät akustiset olosuhteet. Luokka C perustuu rakennusmääräyskokoelman osan C1 (1998) [3] ehtoihin, joissa määritellään uusien rakennusten vähimmäisvaatimuksia niiltä osin kuin sellaisia on. Kyseisessä luokassa rakennuksen ulkopuolisen äänilähteen aiheuttamat melutasot vastaavat valtioneuvoston päätöksen 993/1992 [22] ohjearvoja.

Ilmaäänieristysluvun $R'_w$ tai ilmaäänieristysluvun ja spektrisovitustermin $C_{50-3150}$ summan arvo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asuinhuoneiston ja rakennuksessa olevan liike-, toimisto-, ravintola, tai muun meluisan tilan tai autotallin välillä</li> <li>- Vähintään yhden asuinhuoneiston huoneen ja asuinhuoneiston muiden tilojen välillä.</li> </ul>
Askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ tai askeläänitasoluvun ja spektrisovitustermin $C_{1,50-2500}$ summan arvo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asuinhuoneiston ja rakennuksessa olevan liike-, toimisto-, ravintola, tai muun meluisan tilan tai autotallin välillä</li> <li>- Asuinhuoneiston tiloista vähintään yhteen huoneeseen asuinhuoneiston sisällä.</li> </ul>
Rakennuksen LVIS-laitteiden aiheuttama äänitasot $L_{A,eq,T}$ ja $L_{A,max}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asuinhuoneissa</li> <li>- Keittiössä</li> <li>- Saman tai läheisen rakennuksen ikkunan ulkopuolella, parvekkeella, pihamaalla tai muussa vastaavassa paikassa asuinalueella ja muilla melulle herkillä alueilla.</li> </ul>
Rakennuksen ulkopuolisen äänilähteen aiheuttamat äänitasot (erikseen yöllä ja päivällä) $L_{A,eq,22-7}$ ja $L_{A,eq,7-22}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asuinhuoneissa</li> <li>- Keittiössä</li> <li>- Oleskelualueilla ulkona</li> </ul>

**Taulukko 2.1** Pientalon standardinmukaiset mittaukset

Pientalon akustista luokitusta varten standardin SFS 5907 mukaan tulee mitata taulukossa 2.1 olevat arvot (oletuksena omakotitalo, jossa ei ole minkäänlaista liiketilaa). Kuten taulukosta nähdään, standardi ei ota kantaa huoneakustiikkaan pientaloissa. Kuitenkin asumismukavuutta ajatellen, jälkikaiunta-ajalla on merkitystä. Sen huomiotta jättäminen standardissa on ymmärrettävää, sillä standardi pohjaa lähinnä hyvin perustavanlaatuisiin vaatimuksiin. Tässä työssä otetaan kuitenkin kantaa jälkikaiunta-aikaan ja haetaan sille tavoitearvo. Tavoitteen arvioimisessa voidaan hyödyntää kerrostaloasunnoille ja vanhusten palvelutaloille asetettuja tavoitearvoja, sillä niille standardi antaa suosituksia jälkikaiunta-ajan suhteen.

## **2.4 Olohuone kuuntelutilana**

Nykyään yhä useammassa kodissa sijoitetaan suuria summia äänentoistolaitteisiin. Parasta äänenlaatua ei kuitenkaan saada ilman hieman tarkempaa tuntemusta laitteiden sijoittelusta ja huoneen akustoinnista. Näistä asioista on saatavilla paljon sekä teoriapohjalta opittua että käytännön kokemusten kautta hankittua tietoa. Moni alan harrastaja on omistautunut asialle syvällisesti ja rakentanut tietoa hyväksikäyttäen kotiteatteria varten aivan oman huoneen. Kuitenkin paljon suurempi joukko ihmisiä ei mene näin pitkälle, vaan tyytyy ainoastaan sijoittamaan hieman enemmän rahaa laitteisiin. Moni ihminen laittaa äänentoistolaitteensa olohuoneeseen, joka toimii päivittäisessä elämässä kuuntelutilan lisäksi mahdollisesti ruokailutilana sekä kaikenlaisen muun toiminnan keskuksena. Tällöin sisustusta ei voida tehdä pelkästään akustiikan kannalta, vaan huoneen tulee olla käytännöllinen myös muuhun kuin elokuvien katseluun ja musiikin kuunteluun. Äänentoiston laatuun voidaan silti vaikuttaa pienilläkin asioilla tilan toimivuuden kärsimättä.

Seuraavassa on lyhyt pintaraapaisu audiolaitteiden sijoittelusta ja kuuntelutilan akustoinnista käytännön tasolla. Siinä käydään läpi lyhyesti tärkeimpiä asioita kuuntelutilaan liittyen ja esitellään muutama helppo tapa parantaa ääniolosuhteita. Syvempää teoriatietoa on esitetty tässä dokumentissa aiemmin ja sitä löytyy myös muualta kirjallisuudesta.

### *2.4.1 Audiolaitteiden sijoittelu*

Yleensä olohuoneissa kaiuttimien sijoituspaikat riippuvat melko vahvasti muista seikoista kuin esimerkiksi kuuntelupisteen sijainnista. Jos asiaan voidaan vaikuttaa, on syytä hieman kokeilla eri vaihtoehtoja. Perussääntönä

stereokuuntelussa on, että kaiuttimien etäisyys toisistaan tulisi olla sama kuin niiden etäisyys kuuntelijasta. Tällöin kaiuttimet ja kuuntelupiste muodostavat yhdessä tasasivuisen kolmion. Asetelman pitäisi auttaa hyvän stereokuvan muodostumisessa. Kuuntelijan tulisi nähdä kaiuttimet kuunnellessaan, jotta suora ääni pääsee vastaanottopisteeseen. Kaiuttimet on suunniteltu suoran äänen mukaan, ja äänenlaatu ei ole tarkoituksenmukainen, jos kuuntelupisteessä kuullaan vain heijastuksia [32].

Raskaat ja massiiviset rakenteet heijastavat matalia taajuuksia hyvin. Varsinkin kivitaloissa kannattaa siis kaiuttimet ottaa irti seinistä ja nurkista, ellei kaiuttimia ole erikseen suunniteltu juuri niihin asennettaviksi. Nk. Waterhouse-ilmiössä [33] voimistuvat interferenssin johdosta kaikki taajuudet, joiden aallonpituuden neljännes on suurempi kuin kaiuttimen etäisyys seinästä. Sama efekti on myös vastaavasti kuuntelupisteessä. Jo 50 cm:n etäisyys seinästä auttaa tähän kiusalliseen bassokorostumaan. Kevyet rakenteet taas päästävät matalia taajuuksia lävitseen helpommin, joten joissain tapauksissa bassoa tarvitaankin lisää, jolloin kaiuttimet kannattaa viedä lähemmäs seiniä ja nurkkia.

Kaiuttimien sijoitteluun vaikuttavat myös kaiuttimien ominaisuudet. Mikäli käytössä on kunnolla suunniteltuja kaiuttimia, joilla on tarkemmin määritellyt suuntakuviot, kannattaa sijoittelussa noudattaa niille annettuja ohjeita. Viime kädessä sijoittelu kannattaa kuitenkin tehdä oman kuuntelukokemuksen perusteella. Kaiutin kannattaa sijoittaa sinne, missä se kuulostaa parhaimmalta omaan korvaan. Näiden ohjeiden tarkoituksena on helpottaa sen paikan löytymistä.

#### *2.4.2 Huoneen akustointi*

Moni ei välttämättä tiedosta akustoinnin merkitystä kotiteatterien yhteydessä. Jos äänentoistolaitteisiin sijoitetaan tuhansia euroja, olisi syytä harkita myös muutaman sadan euron panostusta akustiikkaan. Kuunteluhuoneen akustiikan suunnittelu kannattaa aloittaa kaiuttimien sijoittelun ja kuuntelupisteen sijainnin pohtimisella. Huoneakustisessa suunnittelussa tulisi pyrkiä mahdollisimman suureen symmetrisyyteen hyvän stereokuvan saamiseksi.

Koska kaiuttimet on suunniteltu nimenomaan suoran äänen mukaan, kannattaa kaiuttimen ja kuuntelupisteen välisiä aikaisia heijastuksia minimoida. Aikaiset heijastukset tarkoittavat ääntä, joka tulee kuuntelupisteeseen heti suoran äänen jälkeen esimerkiksi seinän tai lattian kautta. Lattian kautta heijastunutta ääntä on

helppo vaimentaa matolla. Seinien kautta tulevaa ääntä varten tulisi seiniin saada jotakin ääntä vaimentavaa materiaalia, kuten esimerkiksi seinävaate tai akustiikkalevy. Myös kattoheijastuksia voi tulla ainakin matalissa kuuntelutiloissa ja niiden vaimentamiseen akustiikkalevyt ovat omiaan.

Kuunteluhuoneessa tärkeää on myös saada jälkikaiunta hallintaan. Hyvä arvo jälkikaiunta-ajalle kuunteluhuoneessa on 0,3-0,6 s [34], [35]. Tämän saavuttaminen kivitalon korkeassa olohuoneessa ei välttämättä ole realistista, mutta kyseessä onkin korkealaatuisen kuuntelutilan tavoiteaika. Huoneen vaimentamiseen liittyvää asiaa on käsitelty tarkemmin luvussa 2.1. Matot, paksut huonekalut, kirjahyllyt yms. vaimentavat ääntä ja lisävaimennusta saadaan tarvittaessa akustiikkalevyillä. Jos huoneessa esiintyy tärykaikua, kannattaa se paikallistaa ja asentaa ääntä vaimentavaa materiaalia johonkin kaikua aiheuttavista pinnoista. Huonemoodien takia kannattaa materiaalia asentaa myös useampaan kuin yhteen pintaan. Mikäli äänentoistossa havaitaan suurta bassokorostumaa ja kaiuttimia ei voida ottaa irti seinistä, voidaan kaiuttimien yläpuolelle kattoon asentaa vaimennusmateriaalia sammuttamaan korostumia aiheuttavia, lattian ja katon välisiä seisovia aaltoja. Myös sähköisellä vastekorjauksella saadaan pienennettyä ei-toivottuja korostumia ja vahvistettua liiaksi vaimentuneita taajuuksia.

### 3 MITTAUSMETODIIKKA

Tässä luvussa käsitellään edellämainittujen, huoneakustisten sekä eristämiseen liittyvien tunnuslukujen mittaamista. Muualla on saatavilla myös paljon syvällisemmin aihetta käsitteleviä teoksia, ja koska mittausmetodiikka ei ole työn pääpainopisteenä, käsitellään asioita hieman yleisemmin.

#### 3.1 Yleistä

Rakennus- ja huoneakustiikkaan liittyvien tunnuslukujen mittausmetodiikka on standardoitu, ja standardit, joihin mittauksissa nojataan ovat ISO 3382, SFS-EN ISO 140-4 ja SFS-EN ISO 140-7 [36], [37], [38]. Mittaustulosten perusteella tehtävä luokittelu tapahtuu standardeihin SFS-EN 717-1 ja SFS-EN 717-2 nojautuen [23], [26]. Poikkeuksena tähän on STI:n, RASTI:n ja STIPA:n mittaukset, jotka tehdään standardin IEC 60268-16 mukaan [16].

#### 3.2 Jälkikaiunta-ajan mittaus

Jälkikaiunta-ajan mittaukseen on olemassa edellä mainitun lisäksi muitakin standardeja. Niihin ei tässä työssä kuitenkaan keskitytä. Käytännön standardinmukainen mittaus tehdään terssi- tai oktaavikaistoittain kalustetussa huoneessa vähintään välillä 250 Hz - 4000 Hz. Mittaus paikkakeskiarvoistetaan tilasta riippuen 6-8 mittauspisteen kesken [36], [4].

Jälkikaiunta-ajan mittauksissa tulee mittalaitteen olla riittävän kaukana lähteestä, jotta voitaisiin olla varmoja, että laite on kaiuntakentässä, jota ei dominoi suoran äänen energia. Minimietäisyys on [36]

$$d_{\min} = 2\sqrt{\frac{V}{cT_{60}}} \quad (33)$$

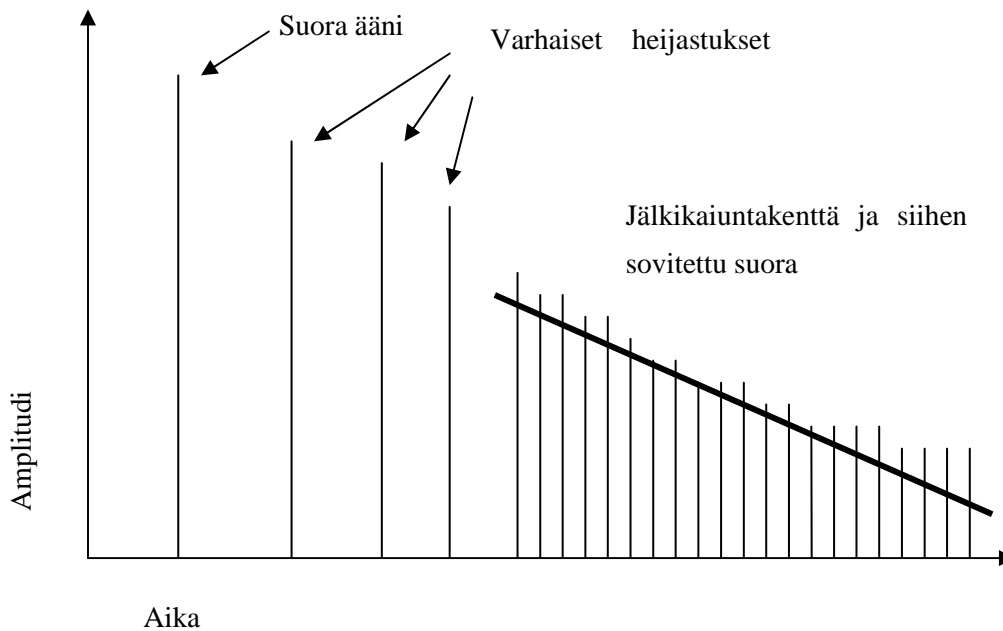
Herätteenä voidaan käyttää joko laajakaistaista tai suodatettua kohinaa tai hyvin lyhyitä pulsseja. Terssikaistoittain suodatettu huonevaste  $h(t)$  piirretään muotoon  $20 \lg |h(t)|$ , ja se keskiarvoistetaan paikan suhteen. Tämän jälkeen kuvaajaan voidaan sovittaa suora, josta nähdään 60 dB:n vaimentumiseen kulunut aika. Joskus, varsinkin voimakkaiden huonemoodien läsnäollessa, kuvaaja ei ole kovin siisti ja siihen on vaikea sovittaa suoraa. Tällöin voidaan käyttää ns. Schroederin menetelmää, eli käänteistä integrointia, joka perustuu seuraavaan yhteyteen kaikkien mahdollisten vaimenemiskäyrien ryhmäkeskiarvon ja



vastaavan impulssivasteen välillä.

$$\langle y^2(t) \rangle_e = \int_t^\infty |h(\tau)|^2 d\tau = \int_0^\infty |h(\tau)|^2 d\tau - \int_0^t |h(\tau)|^2 d\tau \quad (34)$$

Kaavassa (34)  $y(t)$  on vaimeneva vaste ja  $h(\tau)$  järjestelmän impulssivaste. Tällä menetelmällä saadaan vaimenemisen verhokäyrästä laskeva ja siten huomattavasti siistimpi ja siihen on helppo sovittaa suora. Vaimeneminen saattaa olla epätasaista ensimmäisillä millisekunneilla, jolloin ensimmäiset yksittäiset heijastukset saapuvat. Se ei myöskään välttämättä laske täyttä 60:tä desibeliä, jos esimerkiksi taustamelutaso on suuri. Tällöin  $T_{60}$  voidaan estimoida asettamalla suora alkamaan vasta esimerkiksi 5 dB:n vaimennuksen jälkeen ja jatkamalla suoraa 25 dB:n vaimennukseen saakka. Kun tulos kerrotaan kolmella saadaan 60 dB:n vaimentuma. Tämä vastaa sitä, että edellisestä 20 dB:n vaimentumasta piirrettyä suoraa jatketaan taustamelutason alapuolelle [9].



**Kuva 3.1** Huoneen impulssivaste

Mittaus voidaan suorittaa myös käyttämällä MLS- tai Log sweep-menetelmää, joilla molemmilla saadaan huoneen impulssivaste määritettyä [9], [39]. Näitä menetelmiä ei kuitenkaan käytetä tässä työssä. Mittaustulosten maksimivaihtelu tavoitearvoihin nähden tulisi olla taajuudella 125 Hz  $\pm 0,3$  s ja ylempillä taajuuksilla  $\pm 0,1$  s. Jälkikaiunta-aika voidaan esittää yhtenä arvona ilman taajuuskaistakohtaista informaatiota. Tämä arvo saadaan ottamalla keskiarvo 500

ja 1000 Hz oktaavikaistojen tai vaihtoehtoisesti 400-1250 Hz:n terssikaistojen arvoista [36].

### 3.3 Äänitason mittaus

Liikennemelun tai muun rakennuksen ulkopuolisen melun raja-arvot esitetään A-painotettuina keskiäänitasoina  $L_{A,eq,07-22}$  päiväajalle (klo 7...22) ja  $L_{A,eq,22-07}$  yöajalle (klo 22...7). Mittauksissa käytetään aikapainotusta F (*fast*). Ikkunoiden tulee olla suljettuina ja ilmastointiaukkojen avonaisina. Mittauspaikka tulee valita huolella siten, ettei esimerkiksi ulkona mitatessa mitata aivan seinän vieressä, jolloin melutaso kasvaa heijastusten johdosta. Muutenkin eri paikkoihin kohdistuva melutaso tulee ottaa huomioon mittauspaikkaa valitessa. On suositeltavaa suorittaa mittaukset pitkäaikaisina seurantamittauksina, jos ei voida täydellä varmuudella saada mittaushetkellä äänitilannetta, joka on keskiarvoa edustava [4]. Rakennuksen ulkopuolisen lähteen aiheuttama äänitaso mitataan rakennuksessa erikseen asuintiloissa, keittiössä sekä ulkotiloissa. Jokaiselle on omat suositusarvonsa.

Myös rakennuksen LVIS-laitteiden aiheuttamat äänitasot mitataan eri huoneissa. Asuintiloille, keittiölle sekä ulkotiloille on omat suosituksensa  $L_{A,eq,T}$  ja  $L_{A,max}$  sekä päivä- että yöaikaan. LVIS-laitteiden aiheuttamaa äänitasa koskevat vaatimukset eivät koske ääntä, joka aiheutuu samassa huoneistossa tapahtuvasta vedenlaskusta, viemäriäänistä omaan huoneistoon tai muusta käytettävästä laitteesta.

Mittaus tehdään siten, että ensin mitataan äänitaso kun LVIS-laitteet ovat päällä. Tämän jälkeen laitteet sammutetaan ja mittaus toistetaan. Näistä kahdesta mittaustuloksesta voidaan siten laskea haettu LVIS-laitteiden aiheuttama äänitaso seuraavalla tavalla. Tässä mittauksessa perusoletuksena on, että taustamelu säilyy mahdollisimman samanlaisena eri mittausten aikana.

$$L_{p,LVIS} = 10 \lg \left( 10^{L_{p,ON}/10} - 10^{L_{p,OFF}/10} \right) \quad (35)$$

Kaavassa  $L_{p,LVIS}$  on LVIS-laitteiden aiheuttama äänipainetaso,  $L_{p,ON}$  on kokonaisäänipainetaso LVIS-laitteiden ollessa päällä, ja  $L_{p,OFF}$  on kokonaisäänipainetaso LVIS-laitteiden ollessa pois päältä.

Rakennusinsinööriliiton ohjeessa, RIL 129 Ääneneristyksen toteuttaminen,

[24] on tehty selkeä taulukko, jota käyttämällä logaritmisia laskutoimituksia ei tarvitse tehdä, vaan LVIS-laitteiden tuottama äänitaso  $L_{p,LVIS}$  saadaan vähentämällä kokonaisluku  $N$  mitatusta tasosta  $L_{p,ON}$ . Luku  $N$  saadaan taulukosta 3.1.

$L_{p,ON} - L_{p,OFF}$	$N$
10	0
6...9	1
4...5	2
3	3
2	4

**Taulukko 3.1** LVIS-laitteiden tuottaman äänitason  $L_{p,LVIS}$  laskentaan tarvittavan termin  $N$  määrittäminen äänitasoista  $L_{p,ON}$  ja  $L_{p,OFF}$

Äänitasomittauksissa käytännössä saavutetaan parhaimmillaan suuruusluokaltaan  $\pm 1 \dots \pm 2$  dB:n epätarkkuus. Siksi tulokset pyöristetäänkin aina 1 dB:n tarkkuudelle [9]. Tästä johtuen äänitasa  $L_{p,LVIS}$  ei voida mitata, mikäli erotus  $L_{p,ON} - L_{p,OFF}$  on pienempi kuin 2 dB.

### 3.4 Ilmaääni- ja askeläänieristyksen mittaus

Ilmaäänieristyksen mittaus tehdään terssikaistoittain. Standardin SFS 5907 mukaan luokissa C ja D mittaukset tehdään perinteisesti alkaen 100 Hz kolmannesoktaavikaistasta, kun taas luokissa A ja B kaistaa on laajennettu alkamaan 50 Hz:stä. Ylärajataajuutena on ilmaäänieristysmittauksissa käytetty arvoa 3150 Hz.

Mittauksessa äänilähde kytketään päälle ääntä lähettävässä huoneessa, ja molemmissa huoneissa mitataan äänipainetaso joko samaan tai eri aikaan. Mittaukset tehdään useammassa kohdassa huoneita, ja tuloksista lasketaan huonekohtaisesti paikkakeskiarvot. Paikkakeskiarvot lasketaan samaan tapaan kuin edellä LVIS-laitteiden aiheuttaman äänipainetason kohdassa.

$$\bar{L}_p = 10 \lg \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \right) \quad (36)$$

Kaavassa  $L_j$  on äänipainetaso yhdessä kohdassa huonetta ja  $n$  tarkastelupisteiden lukumäärä. Paikkakeskiarvoista saadaan kaavaan (27) sijoittamalla äänieristävyys, josta edelleen saadaan standardin SFS-EN ISO 717-1 mukaan ilmaäänieristävyysluku [4], [23].

Kuten ilmaäänieristyksenkin kohdalla, askeläänieristyksen mittaus tehdään terssikaistoittain. Standardin SFS 5907 mukaan luokissa C ja D mittaukset tehdään perinteisesti alkaen 100 Hz kolmannesoktaavikaistasta, kun taas luokissa A ja B kaistaa on laajennettu alkamaan 50 Hz:stä. Ylärajataajuutena askeläänimittauksissa on sama 3150 Hz kuin ilmaäänieristysmittauksissakin. Mittauksen ajaksi kytketään ääntä lähettävässä huoneessa askeläänikoje päälle, jonka jälkeen äänipainetasomittaus tehdään vastaanottohuoneessa. Mittaus tehdään useammassa kohdassa huonetta, jonka jälkeen tuloksista lasketaan keskiarvo. Saatu askeläänitason paikkakeskiarvo sijoitetaan kaavaan (31) jonka jälkeen askeläänitasoluku saadaan standardin SFS-EN ISO 717-2 mukaan. Spektrisovitusermit mitataan ja lasketaan sekä kaistoilla 50-2500 Hz että 50-3150 Hz [4], [26].

Mittauksia tulee tehdä riittävästi [4] koko rakennuksen luokittelua varten. Ilmaäänieristyslukujen ja askeläänitasolukujen mittauksissa mittausepävarmuus standardin ISO 140-2 mukaan on  $\pm 1,5$  dB. Spektrisovitusermien mittausepävarmuutta ei määritellä standardeissa, mutta joidenkin tutkimustulosten mukaan summan  $L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$  mittausepävarmuus on noin  $\pm 3$  dB 100 Hz ja sitä suuremmilla taajuuksilla sekä  $\pm 4,5$  dB pienemmillä 50, 63 ja 80 Hz taajuuksilla [4], [29].

### 3.5 STI:n, RASTI:n ja STIPA:n mittaus

Puheensiirtoindeksiä mitattaessa herätteenä käytetään puheenomaista signaalia. Tämä signaali on tarkemmin sanottuna 100% amplitudimoduloitua kohinaa, jonka spektri vastaa puheen spektriä ja taso puheen tasoa. Mittaus toistetaan eri modulaatiotaajuuksilla 0,63 Hz - 12,5 Hz 1/3-oktaavin askelin. Mikrofonilla rekisteröidään vastesignaali oktaavikaistoilla 125...8000 Hz, 4-8:ssa paikassa huoneessa, jokaisella modulaatiotaajuudella.

Vaihtoehtoisesti mittaus voidaan suorittaa myös siten, että huoneessa mitataan impulssivaste äänilähteen kohdalla vastaanottopisteeseen sekä sen lisäksi taustamelu kuulijan kohdalla. Näistä tiedoista voidaan digitaalisen signaalinkäsittelyn avulla laskea sekä STI että RASTI.

STI:n ja RASTI:n mittauksessa mitattavat oktaavikaistat modulaatiotaajuuksittain on esitelty seuraavassa taulukossa 3.2. STI mitataan taulukon jokaisessa solussa ja RASTI ainoastaan 'X' merkityissä kohdissa. [15].

Modulaatiotaajuudet RASTI:n mittauksessa ovat siis 500 Hz:n oktaavikaistalla

1 Hz, 2 Hz, 4 Hz sekä 8 Hz. 2 kHz:n oktaavikaistalla modulaatiotaajuudet ovat 0,7 Hz; 1,4 Hz; 2,8 Hz; 5,6 Hz ja 11,2 Hz. Kaikkien modulaatiotaajuuksien toleranssi on 0,5 % [40].

$f$ [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$f_m=0,63\text{Hz}$					X		
$f_m=0,8\text{Hz}$							
$f_m=1,0\text{Hz}$			X				
$f_m=1,25\text{Hz}$					X		
$f_m=1,6\text{Hz}$							
$f_m=2,0\text{Hz}$			X				
$f_m=2,5\text{Hz}$					X		
$f_m=3,15\text{Hz}$							
$f_m=4,0\text{Hz}$			X				
$f_m=5,0\text{Hz}$					X		
$f_m=6,3\text{Hz}$							
$f_m=8,0\text{Hz}$			X				
$f_m=10\text{Hz}$							
$f_m=12,5\text{Hz}$							

**Taulukko 3.2** STI:n ja RASTI:n mittauskaistat ja modulaatiotaajuudet

STIPA:n mittauksessa käytetään samoja seitsemää taajuuskaistaa, jolla kullakin käytetään kahta modulaatiotaajuutta. Taajuuskaistat ja modulaatiotaajuudet on taulukoitu taulukkoon 3.3. STIPA:n mittaus voidaan tehdä huomattavasti nopeammin kuin STI:n, koska kaikki taajuuskaistat voidaan mitata samanaikaisesti.

Oktaavikaista (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1. Modulaatiotaajuus (Hz)	1,00	1,00	0,63	2,00	1,25	0,80	2,50
2. Modulaatiotaajuus (Hz)	5,00	5,00	3,15	10,0	6,25	4,00	12,5

**Taulukko 3.3** STIPA –metodin modulaatiotaajuudet taajuuskaistoittain

Jotta ohjearvot olisivat vertailukelpoisia, tilan tulisi olla sisustettu ja kalustettu. Mittauksen aikana paikalla ei tule olla ihmisiä ja LVIS-laitteiden säätöjen tulee olla kohdallaan, jotta taustamelun taso on sama kuin normaalikäytössä [41], [16]. STI:n mittauksissa mittausvirhe on tyypillisesti alle  $\pm 0,03$  [4].

## 4 KOHTEIDEN ESITTELY

Työn kokeellisessa osassa tarkastellaan kolmea pientaloa. Tässä luvussa esitellään kohteena olevat rakennukset, kerrotaan niistä yleisesti sekä pohditaan mahdollisia ongelmakohtia akustiikan suhteen. Tämän jälkeen kohteiden olohuoneista mitataan jälkikaiunta-aika ja tuloksia analysoidaan.

### 4.1 Kohderakennusten tiedot

Työssä kohteena on kolme Tampereen suunnalla sijaitsevaa, kahitiilirunkoista pientaloa, joissa kussakin on kaksi kerrosta korkea olohuone. Jokaisessa kohteessa on talon valmistumisen jälkeen havaittu ikävää kaiuntaa, joka häiritsee normaalielämää talossa.

#### 4.1.1 Kohde 1

Ensimmäinen kohde on omakotitalo, joka sijaitsee pientaloalueella lähellä junarataa. Ohi kulkevien junien aiheuttama värinä tuntuu hieman myös talon sisällä. Muu ulkoa tuleva melu vaikuttaisi olevan suhteellisen pientä rauhallisen sijainnin ja perushyvän julkisivueristyksen vuoksi. Ongelmana talossa on keskikerroksen kaiuntainen ja äänekäs olohuone. Olohuone on 6,05m pitkä ja sen leveys on 5,26m. Korkeus vinon katon matalassa päässä on 3,63m ja korkeassa päässä 5,85m. Näillä mitoilla laskettuna huoneen tilavuudeksi tulee 150,84m<sup>3</sup>. Tila on siis varsin suuri, ja tämä yhdistettynä niukkaan kalustukseen tekee huoneesta kaiuntaisen.

Jälkikaiunta-aikamittaus tehtiin olohuoneessa. Huoneessa on paljon ikkunapinta-alaa ja sieltä on avoin yhteys eteiseen, keittiöön, ylä- ja alakerran auloihin sekä portaikkoihin. Yläkerrassa on myös pieni ”urkuparvi”, josta myös on yhteys olohuoneeseen. Kalusteina huoneessa on mm. sohva, televisio, matto, pöytä ja kaksi sohvuolia. Verhot ovat melko ohuet. Seinämateriaali on muurattua kivirakennetta, joka on tasoitettu. Katossa on kaksinkertaista kipsilevyä paksuudeltaan 2 x 13 mm, ja on lattia parkettia. Mittauksen aikana paikalla oli neljä ihmistä.

#### 4.1.2 Kohde 2

Kohde 2 on paritalo vilkkaan tien lähellä. Talon ja tien välissä on kuitenkin meluvalli ja talon julkisivueristys on hyvä, joten ulkoa tuleva melu on suhteellisen

pientä. Seinä, joka erottaa talon toisesta puoliskosta, on tehty huolellisesti ja ainoastaan perustus on yhtenäinen. Muuten välissä on ilmaväli, eikä värähtely pääse täten etenemään juurikaan huoneistosta toiseen. Ongelmana tässäkin kohteessa on kaiuntainen olohuone. Normaalin ikävän kaiun lisäksi talossa on havaittu voimakasta tärykaikua sekä ala- että yläkerrassa, ja tilat vaikuttavat varsin äänekkäiltä. Myös esimerkiksi television ääni kantautuu yläkertaan aivan liian voimakkaasti. Talon olohuone on 4,96m pitkä ja sen leveys on 3,58m. Korkeus vinon katon matalassa päässä on 5,17m ja korkeassa päässä 5,67m. Näillä mitoilla laskettuna huoneen tilavuudeksi tulee 96,24m<sup>3</sup>.

Mittaus tapahtui olohuoneessa, joka sijaitsee asunnon alakerrassa. Huoneesta on avoin yhteys eteiseen, keittiöön, pieneen olohuoneeseen, yläkerran aulaan sekä portaikkoon. Huoneen kalustukseen kuuluu mm. sohva, televisio, matto, pöytä, kirjahylly ja nojatuoli. Verhot ovat melko ohuet. Kaikki olohuoneen seinä-, lattia- ja kattorakenteet ovat vastaavia kuin kohteessa 1. Mittauksen aikana paikalla oli kolme ihmistä.

Olohuoneen geometriasta voidaan jo päätellä, että TV:n äänen ja muiden äänien kantautuminen on yläkertaan melko voimakasta. Vinon katon korkea pääty on yläkerran aulaan kokonaan avoin, ja näin katto sekä seinät heijastavat hyvin alakerrassa syntyviä ääniä yläkertaan. Tämä on kiusallista, sillä yläkerrassa sijaitsevat kaikki talon makuuhuoneet.

#### *4.1.3 Kohde 3*

Kohde 3 on omakotitalo, joka sijaitsee hiljaisessa taajamassa. Julkisivueristys on tehty asiallisesti, joten ulkoa tuleva melu on olemattoman pientä. Tässä kohteessa akustointia on tehty häiritsevän kaiun takia jo aiemmin olohuoneen sekä kahden makuuhuoneen seiniin asennetuilla akustiikkalevyillä. Nyt kyseessä ovat tarkistusmittaukset sekä pieni parantelu lisäasennuksilla. Olohuoneen pituus on 4,03m ja leveys on 5,01m. Korkeus vinon katon matalassa päässä on 2,98m ja korkeassa päässä 4,80m. Näillä mitoilla laskettuna huoneen tilavuudeksi tulee 78,54m<sup>3</sup>. Olohuoneen yhteyteen on ennen kuulunut pienempi huone, mutta se on muutettu makuuhuoneeksi ja erotettu olohuoneesta väliseinällä. Tämä on vaikuttanut olohuoneen akustiikkaan, kytkeytyneen tilavuuden pienentyessä.

Mittaus kohteessa tapahtui olohuoneessa, joka sijaitsee asunnon keskikerroksessa. Huoneesta on avoin yhteys keittiöön, alakerran aulaan sekä portaikkoon. Huoneen sisustus on normaali ja siihen kuuluu mm. sohva, keinutuoli,

televisio, matto, pöytä, lasivetriini sekä pieni stereo/CD-levykaappi. Verhot ovat melko ohuet. Seinä- ja lattiamateriaali on samaa kuin muissakin kohteissa lukuunottamatta yhtä sisäseinää, jossa on ollut aukko toiseen huoneeseen. Aukko on myöhemmin suljettu puurunkoisella kipsilevyseinällä. Lisäksi olohuoneen ja toisen kerroksen aulan välissä on puurunkoinen kipsilevyseinä, mutta se on päällystetty kokonaan akustiikkalevyllä. Kattorakenne on vastaavanlainen kuin kohteissa 1 ja 2. Mittauksen aikana paikalla oli kolme ihmistä.

Lähtötilanne on siis varsin hyvä. Olohuoneeseen asennetut akustiikkalevyt on laitettu vinon katon korkean päädyn seinään. Sijainti on optimaalinen, sillä huoneessa syntynyt ääni heijastuu kyseiseen seinään vinon katon ansiosta. Koska asukkaiden havaintojen mukaan pientä parantelua olisi vielä hyvä saada, suoritetaan mittaukset ja tehdään muutokset.

#### *4.1.4 Ongelmien tarkastelua*

Kohteiden ongelmat ovat hyvin samankaltaisia, joten niitä tutkitaan aluksi yhdessä. Jokaisessa kohteessa suurin osa seinärakenteista on kovia ja raskaita ja ne heijastavat kaikkia taajuuksia todella hyvin. Huoneiden suuri korkeus aiheuttaa sen, että jälkikaiunta-aika on suurempi kuin yhtäsuuren pinta-alan omaavassa, matalammassa huoneessa (vrt. Sabinen kaava (6)). Kaikissa kohteissa on suora yhteys monen muun tilan lisäksi myös keittiöön, jossa on erityisen paljon kovia pintoja ja hyvin vähän mitään ääntä vaimentavaa materiaalia. Täten keittiö lisää tilan kaiuntaa. Olohuoneiden katossa on kipsilevyä ja lattiassa parkettia, joten ne eivät heijasta ääntä, varsinkaan matalilla taajuuksilla, aivan niin hyvin kuin seinät.

Olohuoneissa on vino katto ja se vaikuttaa äänikenttään omalla tavallaan. Katon ja lattian väliin ei muodostu aksiaalisia moodeja, joten huonemoodeja syntyy eri taajuuksille, kuin samankokoisessa tasakattoisessa huoneessa. Moodien sekä tärykaiujen käyttäytymisen tutkimista ja tarkempaa laskentaa varten pitäisi käyttää erillistä simulointiohjelmaa. Sellaista ei ole tämän työn puitteissa käytettävissä, joten moodilaskentaa yksinkertaistetaan hieman. Katto ohjaa ylös kantautuvaa ääntä samaan tapaan kuten peili ohjaa valoa. Kohteissa 1 ja 3 se tarkoittaa sitä, että ääntä saadaan heijastumaan seinään, johon voidaan sijoittaa vaimennusmateriaalia. Kohteessa 2 ja osittain myös kohteessa 1 se tarkoittaa sitä, että ääni ohjautuu ylempään kerrokseen, joka myös toimii kaikukammiona lisäten huoneen jälkikaiunta-aikaa. Kohteessa 2 vinon katon korkeammassa päädyssä seinää ei ole ollenkaan, vaan paikalla on koko seinän levyinen aukko olohuoneen ja yläkerran aulan välillä.



Kaikissa olohuoneissa sisustus on melko tavallinen. Kovinkaan massiivisia sohvia tai muita ääntä huomattavasti vaimentavia sisustuselementtejä ei ole juurikaan käytetty. Verhot ovat ohuet kaikissa kohteissa ja jokaisella on keskikokoinen sohva sekä muuta normaalia olohuonekalustusta, kuten pöytiä, kirjahyllyjä ja tuoleja.

Kohteessa 1 on asukkaan mukaan ongelmana voimakkaan kaiunнан lisäksi vierestä kulkevien junien aiheuttama tärinä. Rakennus sijaitsee noin sadan metrin päässä junaradasta. Junat eivät kulje maksiminopeudella tällä kohdalla rataa, mutta syntyvä tärinä vaikuttaa kuitenkin asumismukavuuteen negatiivisesti. Tähän ongelmaan ei kovin pienillä muutoksilla pystytä vaikuttamaan, joten sen ratkaiseminen sivuutetaan tässä työssä. Massiivisilla rakenteilla ja tärinäeristyksellä voidaan saada aikaan parannuksia, mutta niiden toteuttaminen suhteellisen tuoreessa omakotitalossa ei liene mielekäästä.

## 4.2 Mittaukset

Kussakin kohteessa mitataan jälkikaiunta-aikaa seuraavassa kuvatulla laitteistolla. Tuloksia joudutaan esikäsittelemään hieman mittalaitteen antamien, virheelliseksi oletettujen tulosten takia.

### 4.2.1 Laitteisto ja olosuhteet

Ensimmäisiä mittauksia tehdessä käytössä oli Linearxin mittausjärjestelmä, johon kuului analysaattori pcRTA (versio 2.30), mikrofoni m53 sekä kotelo PAC3. Kaiuttimena käytettiin Genelecin 1032A aktiivista 2-tiekaiutinta. Kaiutin ei ole ympärisäteilevä, mutta se asetettiin nurkkaan, jolloin sen luomaa äänikenttää huoneessa voitiin approksimoida diffuusiksi. Laitteistolla voidaan mitata jälkikaiunta-aikaa käyttämällä joko katkaistua kohinaa tai impulssiääntä.

Mittaukset suoritettiin käyttäen katkaistun kohinan menetelmää. Mittausten aikana kohteissa oli ilmastointi kytketty pois päältä ja ulkolämpötila oli n. 25-30 °C. Ilmankosteutta ei mitattu. Mitattava arvo oli 40 dB:n laskuun kuluva aika, joka kerrottiin arvolla 1,5 jälkikaiunta-ajan  $T_{60}$  saamiseksi. Mittauksia tehtiin 16kpl kahdeksalla mikrofoni paikalla ja kahdella eri kaiutinpaikalla eli yhteensä 32kpl / kohde.

#### 4.2.2 Tulosten esikäsittely

Mittaus suoritettiin laajemmalla taajuuskaistalla kuin mitä standardi vaatii, koska se oli helposti tehtävissä käytössä olevilla laitteilla, eikä siihen kulunut ylimääräistä aikaa. Kaikenkaikkiaan tulokset kirjattiin muistiin välillä 20-20000 Hz. Tuloksia kuitenkin tarkasteltiin kriittisesti varsinkin standardinmukaisen kaistan ulkopuolella. Tuloksia esikäsiteltiin aluksi poistamalla niistä virheelliset arvot. Eliminointi tehtiin käsin siten, että hieman suurempiakin vaihteluita sallittiin, mutta selkeästi virheelliset arvot, joiden ero keskiarvoon nähden oli useita sekunteja, hylättiin. Tämä tehtiin siksi, että mittarin tiedettiin antavan välillä hieman kyseenalaisia tuloksia. Tarkistuksen vuoksi tuloksia laskettiin myös niin, että kaikki hyläytykin arvot otettiin huomioon. Molemmilla kerroilla tuloksista laskettiin paikkakeskiarvot taajuuskaistoittain ja näitä vertailtiin keskenään. Erot olivat melko pieniä (0-0,1 s) tarkastellulla kaistalla 50-3150 Hz. Kyseisen kaistan ulkopuolella erot kasvoivat jopa useisiin sekunteihin, minkä perusteella pääteltiin näiden tulosten olevan epäluotettavia. Lopullisissa tuloksissa käytettiin esikäsiteltyjä arvoja.

#### 4.2.3 Tulokset

Jälkikäynnin esittämisessä on standardissa annettu kaksi tapaa. Se voidaan laskea keskiarvona joko 500 Hz:n ja 1000 Hz:n oktaavikaistoista tai 400-1250 Hz:n terssikaistoista. Tulokset on laskettu taulukkoon 4.1 molemmilla tavoilla, ja pientä eroa havaittiin laskentatavasta riippuen.

	<b>Kohde 1</b>	<b>Kohde 2</b>	<b>Kohde 3</b>
$T_{60,500-1000}$ (s)	1,052	0,825	0,816
$T_{60,400-1250}$ (s)	1,067	0,830	0,806

**Taulukko 4.1** Jälkikäyntiajat eri tavoin laskettuina

Erot eivät kuitenkaan ole merkittäviä, sillä tulokset pyöristetään aina 0,1 sekunnin tarkkuudella ja ihminen havaitsee eron jälkikäyntiajassa vasta, kun tulos muuttuu  $\pm 10$  % [42]. Kohteessa 1 jälkikäyntiajaksi saatiin siis 1,1 s, kohteessa 2 saatiin 0,8 s ja kohteessa 3 tulos oli myös 0,8 s. Taajuuskaistoittain tulokset ovat esiteltynä liitteessä A. Ensimmäisenä silmiin pistää kohteiden 2 ja 3 sama arvo. Mielenkiintoiseksi asian tekee se, että kohteeseen 3 on asennettu  $11 \text{ m}^2$  50 mm paksua akustiikkalevyä ja se on  $18 \text{ m}^3$  pienempi tilavuudeltaan, joten tuntuisi loogiselta, että siellä jälkikäyntiaika olisi lyhyempi. Voidaankin arvioida, että kohteissa erilaiset ja eri tavoin olohuoneeseen kytkeytyvät muut tilat vaikuttavat myös tulokseen. Jos tuloksia tarkastellaan tarkemmin, huomataan, että

niiden taajuuskäyttäytyminen on kuitenkin melko erilainen. Kohteessa 2  $T_{60}$  on lähes kauttaaltaan yli 0,8 s, kun taas kohteessa 3 on arvo pienempi pienillä taajuuksilla 100 Hz – 400 Hz. Isoja eroja on myös 50 Hz:n alapuolella, mutta siellä mittaustulokset eivät ole niin luotettavia, että tulkintoja asiasta voisi tehdä. Lisäksi huomioitavaa on se, että kohteen 3 mittauksissa saatiin kaiutinpaikalla 2 lähes systemaattisesti suurempia tuloksia kuin kaiutinpaikalla 1. Muutenkin kaiutinpaikkojen välinen ero oli selkeästi suurempi (maksimissaan 0,1 s) kuin muissa kohteissa. Tämä saattaa johtua siitä, että kaiutinpaikka 2 oli lähellä aukkoa, joka yhdisti olohuonetilan keittiöön. Tällöin suurempi osa äänilähteen tuottamasta tehosta säteili suoraan pois olohuoneesta, ja muun huoneiston akustiset ominaisuudet vaikuttivat tuloksiin enemmän kuin kaiutinpaikalla 1.

#### 4.2.4 Johtopäätökset

Kaikissa kohteissa oli tarvetta akustoinnille. Pitkä jälkikaiunta-aika sekä tärykaiut tekivät huoneiden äänikentät melko epämukaviksi asumisen kannalta. Muiden tilojen kytkeytyminen vaikuttaa olohuoneiden äänikenttään, ja siten niiden vaikutusta kannattaa myös pienentää joko akustoimalla tai eristämällä niitä olohuoneesta.

### 4.3 Moodien laskenta

Mielenkiinnon vuoksi jokaisesta kohteesta lasketaan myös huonemoodeja. Aluksi tulee selvittää Schroeder-taajuus, jonka alapuolella moodeilla on merkitystä. Se on laskettu jokaisessa kohteessa kaavan (5) mukaan taulukkoon 4.2. Taajuuksien laskentaan tarvittavat tilavuus ja jälkikaiunta-aika ovat myös samassa taulukossa.

Kohteen numero	Tilavuus (m <sup>3</sup> )	Jälkikaiunta- aika (s)	Schroeder-taajuus $f$ (Hz)
1	150,84	1,060	167,66
2	96,24	0,828	185,51
3	78,54	0,811	203,23

**Taulukko 4.2** Kohteiden Schroeder -taajuudet

Schroeder-taajuuksien alapuolella on seuraavaksi laskettu huonemoodit kaavan (4) mukaan. Vinon katon johdosta on moodilaskentaa yksinkertaistettu siten, että ainoastaan lattiatason suuntaiset, tangentiaalimoodit on otettu huomioon.

$p$	$q$	$f$ (Hz)		$p$	$q$	$f$ (Hz)
1	0	28,34711		4	0	113,3884
0	1	32,60456		4	1	117,983
1	1	43,20435		3	3	129,6131
2	0	56,69421		0	4	130,4183
0	2	65,20913		4	2	130,802
2	1	65,40101		1	4	133,4634
1	2	71,10407		5	0	141,7355
3	0	85,04132		2	4	142,2081
2	2	86,4087		5	1	145,4373
3	1	91,07735		4	3	149,748
0	3	97,81369		3	4	155,695
1	3	101,8385		5	2	156,0166
3	2	107,1646		0	5	163,0228
2	3	113,0564		1	5	165,469

**Taulukko 4.3** Kohteen 1 moodit Schroeder-taajuuden alapuolella

Kohteen 1 mooditaulukosta 4.3 voidaan tehdä joitakin havaintoja. Ensinnäkin mooditiheys on melko normaalin näköinen myös matalilla taajuuksilla. Schroeder-taajuus on matalin vertailtavista kohteista, mutta sen alapuolella on silti eniten moodeja. Kahden erillisen ominaistajuuden sijoittuminen varsin lähekkäin ( $f(0,2) = 65,2$  Hz;  $f(2,1) = 65,4$  Hz) voi aiheuttaa musiikkia kuunneltaessa korostumaa kyseisellä taajuudella.

$p$	$q$	$f$ (Hz)		$p$	$q$	$f$ (Hz)
1	0	34,57661		4	0	138,3065
0	1	47,90503		3	2	141,2071
1	1	59,07989		0	3	143,7151
2	0	69,15323		4	1	146,3679
2	1	84,12527		1	3	147,816
0	2	95,81006		2	3	159,4873
1	2	101,8583		4	2	168,2505
3	0	103,7298		5	0	172,8831
3	1	114,2575		3	3	177,2397
2	2	118,1598		5	1	179,3975

**Taulukko 4.4** Kohteen 2 moodit Schroeder-taajuuden alapuolella

Kohteessa 2 moodit Schroeder-taajuuden alapuolella ovat taulukon 4.4 mukaan jakautuneet varsin tasaisesti. Mooditiheys ei tosin ole niin suuri kuin kohteessa 1, mutta mitään havaittavia korostumia tai kuoppia äänikenttään tuskin pääsee syntymään.

$p$	$q$	$f$ (Hz)		$p$	$Q$	$f$ (Hz)
0	1	34,23154		0	4	136,9261
1	0	42,55583		1	4	143,3868
1	1	54,61499		3	2	144,8661
0	2	68,46307		2	4	161,2227
1	2	80,61136		3	3	163,845
2	0	85,11166		4	0	170,2233
2	1	91,73763		0	5	171,1577
0	3	102,6946		4	1	173,6312
2	2	109,23		1	5	176,3688
1	3	111,1629		4	2	183,4753
3	0	127,6675		3	4	187,2105
3	1	132,1771		2	5	191,1516
2	3	133,3798		4	3	198,8018

**Taulukko 4.5** Kohteen 3 moodit Schroeder-taajuuden alapuolella

Kohteessa 3 Schroeder-taajuus on suurin. Sen alapuolelle jää paljon moodeja ja ne ovat jakautuneet taulukon 4.5 mukaan melko tasaisesti kaistalle, joten mitään suuresti poikkeavaa käytöstä äänikenttään ei pitäisi tulla.

Kohteen 3 jälkikaiunta-aikamittauksissa havaittiin, että kaiutinpaikalla 1 oli kaksi piikkiä kohdissa 35 Hz ja 90 Hz, joissa sen tulokset olivat suurempia kuin kaiutinpaikalla 2. Jos oletetaan, että huoneen ominaisuudet vaikuttivat enemmän KP1:n kuin KP2:n tuloksiin, voidaan piikeillä arvioida olevan jonkinlainen yhteys samoissa kohdissa oleviin moodeihin ( $f(0,1) = 34,2$  Hz;  $f(2,1) = 91,7$  Hz). Varsinkin alemmalla taajuudella tämä on kuitenkin varsin kyseenalaista spekulointia, sillä mittaustarkkuus ei ole kovin suuri.

## 5 KOHTEIDEN AKUSTINEN SUUNNITTELU

Tämän luvun aluksi luodaan tavoitteet akustiseen suunnitteluun kohteissa. Samalla esitellään myös pientalon akustisen A-luokituksen vaatimukset. Tämän jälkeen kohteissa havaittuja ongelmakohtia pohditaan, tehdään akustointisuunnitelmat yhdessä asukkaiden kanssa ja pyritään hahmottamaan ratkaisujen vaikutusta etukäteen. Akustointi tehdään asukkaiden ehdoilla ja siten, että se toimii ennenkaikkea ulkonäöllisesti.

### 5.1 Tavoitteet

Akustisen suunnittelun tavoitteena on luoda asuntoihin hyvät ääniolosuhteet. Tämä tarkoittaa hyvää äänieristystä ja hyviä huoneakustisia ominaisuuksia. Standardin SFS 5907 myötä akustiselle suunnittelulle on helpompi antaa selkeitä kriteerejä ilman syvempää akustiikan tuntemusta. Asuinrakennuksen akustisessa suunnittelussa olisi yleensä hyvä pyrkiä standardinmukaiseen A-luokitukseen. A-luokitus antaa myyntivaiheessa talolle markkina-arvoa ja helposti ymmärrettävän argumentin. Alarajana kaikessa akustisessa suunnittelussa on käytettävä lainmukaisia määräyksiä rakennusten akustisesta ympäristöstä, eli standardin C-luokkaa.

Pientalon kohdalla standardissa ei ole määräyksiä huoneakustiikkaan liittyen. Tämän työn parannuksissa keskitytään kuitenkin yksinomaan huoneakustiikkaan, joten tavoitteet pitää ensin luoda. Ratkaisussa joudutaan tekemään kompromisseja teknisessä toteutuksessa hinnan ja työmäärän sekä asuntojen omistajien toiveiden vuoksi. Hyvänä tavoitteena olisi, että huoneen jälkikaiunta-aika on sopivan pieni ja mahdollisimman tasainen koko taajuuskaistalla. Huoneessa ei myöskään saisi olla vahvasti resonoivia yksittäisiä moodeja eikä tärykaikuja. Normaalille korkealle olohuoneelle tyypillinen hyvä jälkikaiunta-aika on noin 0,5-0,8 s, riippuen tilasta ja sen suomista mahdollisuuksista sekä käyttötarkoituksesta [1], [43], [44]. Standardissa SFS 5907 annetaan suosituksia asunnon kerhuhuoneen (0,6 s; A-luokka) sekä esimerkiksi vanhusten palvelutalon oleskeluhuoneen (0,5 s; A-luokka) jälkikaiunta-ajalle, jotka ovat jollain tapaa verrattavissa olohuoneeseen. Asuntojen osalta Suomen rakennusmääräyskokoelman C1 -osan määräys koskee ainoastaan käytävätiloja (1,3 s). Myös IEC:n ja ITU:n standardeja [34], [35] kuunteluhuoneen ominaisuuksista voidaan käyttää antamaan perspektiiviä sopivan jälkikaiunta-ajan arvioinnissa. Tällöin jälkikaiunta-ajan suositusarvoa tulisi laskea vielä hieman. Kuitenkaan olohuone ei ole suoraan verrattavissa standardinmukaiseen kuunteluhuoneeseen, joten suoria rinnastuksia on syytä välttää. Ajan

$T_{60} = 0,5$  s saavuttaminen korkeassa kivisessä olohuoneessa ei välttämättä ole yksinkertaista ja siksi tavoite 0,5-0,8 s on melko väljä. Eri olohuoneet ovat varsin erilaisia kooltaan, muodoiltaan sekä sisutukseltaan, ja kaikissa alarajan saavuttaminen ei ole käytännössä mahdollista ilman todella suuria muutoksia.

Annettua tavoitearvoa jälkikaiunta-ajalle voidaan siis perustella monella tapaa erilaisia tutkimuksia ja suosituksia hyödyntäen. Osittain kyseessä on kuitenkin aina mielipide, sillä eri ihmiset aistivat tilan hieman eri tavoin. Perustelujen ja suositusten lisäksi voidaan ajatella, että jos  $T_{60}$  olisi pidempi, huoneen kaiunta olisi liian suurta, jolloin tila muuttuu äänekkäämmäksi ja epäselvemmäksi. Jos taas vaimennusta laitetaan liikaa ja  $T_{60}$  painuu reilusti alle puolen sekunnin, alkaa huone muuttumaan kuolleeksi, ja siellä oleskelu ilman taustamusiikkia voi tuntua epämiellyttävältä. Kuitenkin kyseessä on huone, jossa viettään paljon aikaa, joten siellä tulee olla miellyttävä akustinen ympäristö ja siis hiukan elävyyttä.

STI ja sen johdannaiset kuuluvat myös huoneakustiikkaan. Niiden huomioiminen asuintalon suunnittelussa on hieman arveluttavaa. Erityisesti kouluissa niiden merkitys on kuitenkin paljon suurempi. Niitä voidaan toki mitata pientalossa, ja mittaustuloksia voidaan hyödyntää esimerkiksi markkinoinnissa, mutta niiden ehdoille lienee turhaa suunnitella mitään. Tietenkin, jos jostain syystä arvot ovat luokattomia, ne kannattaa ottaa huomioon. Tosin tällöin joko huoneen jälkikaiunta-aika tai taustamelutaso on luultavasti jo sallittujen rajojen ulkopuolella. Tässä työssä STI-arvoja ei mitata.

## 5.2 Pientalon akustinen luokitus

Pientalojen akustinen luokittelu tapahtuu mittaamalla talosta muutamia arvoja ja vertaamalla niitä annettuihin minimi- ja maksimiarvoihin. Tarkemmin luokittelusta on kerrottu standardissa SFS 5907. Seuraavissa taulukoissa on esitetty standardin antamat kriteerit A-luokkaan sijoittuvalle pientalolle. Ilma- ja askeläänieristyksen tavoitearvot ovat esitettyinä taulukoissa 5.1 ja 5.2 [4].

<b>Ilmäänieristysluvun ja spektrisovitustermien summa</b>	
Asuinhuoneiston ja autotallin välillä	$R'_{w} + C_{50-3150} \geq 68$ dB
Vähintään yhden asuinhuoneiston huoneen ja asuinhuoneiston muiden tilojen välillä.	$R'_{w} + C_{50-3150} \geq 48$ dB

**Taulukko 5.1** Ilmäänieristyksen tavoitearvot

<b>Askeläänitasoluvun ja spektrisovitustermin summa</b>	
Asuinhuoneiston ja autotallin välillä	$L'_{n,W} + C_{1,50-2500} \leq 43 \text{ dB}$
Asuinhuoneiston tiloista vähintään yhteen huoneeseen asuinhuoneiston sisällä.	$L'_{n,W} + C_{1,50-2500} \leq 58 \text{ dB}$

**Taulukko 5.2** Askeläänieristyksen tavoitearvot

Suurimmat sallitut ulkopuolisen äänilähteen sekä LVIS-laitteiden aiheuttamat äänitasot ovat esitettyinä taulukoissa 5.3 ja 5.4.

<b>Ulkopuolisen äänilähteen aiheuttama äänitaso</b>	
Asuinhuoneissa	$L_{A,eq,7-22} \leq 25\text{dB}, L_{A,eq,22-7} \leq 20 \text{ dB}$
Keittiössä	$L_{A,eq,7-22} \leq 30\text{dB}, L_{A,eq,22-7} \leq 25 \text{ dB}$
Oleskelualueilla ulkona	$L_{A,eq,7-22} \leq 55\text{dB}, L_{A,eq,22-7} \leq 50 \text{ dB}$

**Taulukko 5.3** Ulkopuolisen äänilähteen aiheuttaman äänitason tavoitearvot

<b>LVIS-laitteiden aiheuttama äänitaso</b>	
Asuinhuoneissa	$L_{A,eq,T} \leq 24 \text{ dB}, L_{A,eq,max} \leq 29 \text{ dB}$
Keittiössä	$L_{A,eq,T} \leq 29 \text{ dB}, L_{A,eq,max} \leq 34 \text{ dB}$
Saman tai läheisen rakennuksen ikkunan ulkopuolella, parvekkeella, pihamaalla tai muussa vastaavassa paikassa asuinalueella ja muilla melulle herkillä alueilla.	$L_{A,eq,T} \leq 34 \text{ dB}, L_{A,eq,max} \leq 40 \text{ dB}$

**Taulukko 5.4** LVIS-laitteiden aiheuttaman äänitason tavoitearvot

### 5.3 Akustointi

Kaikissa kohteissa ongelmana on siis tilojen äänekkyys ja kaiunta. Tämä johtuu avarista tiloista, joissa on paljon kovia pintoja ja vähän ääntä vaimentavaa materiaalia. Lisäksi ongelmaa suurentaa muiden tilojen kytkeytyminen olohuoneeseen. Jotta jälkikaiunta-aika saataisiin kunnolla kuriin, olisi hyvä saada muut tilat, tai ainakin osa niistä, eristettyä olohuoneesta välivillailla tai joillakin muilla ratkaisuilla. Kuitenkaan tämä ei ole kovinkaan miellyttävä ratkaisu ulkonäöllisesti, sillä talojen suunnittelussa on selkeästi haettu avaruutta ja ison tilan tuntua. Kun tämä vaihtoehto on suljettu pois, on parasta mahdollista tulosta haettava muilla keinoilla.



Jos muita tiloja ei voida eristää olohuoneesta, voidaan parempaa ääniympäristöä yrittää luoda olohuoneen sijasta koko huoneistoon. Tämä tarkoittaa käytännössä muidenkin tilojen akustoitusta. Koko huoneiston akustointi on luonnollisesti paljon kalliimpaa ja työläämpää kuin yhden huoneen, mutta samalla viihtyvyys lisääntyy koko talossa.

### 5.3.1 Kohde 1

Ensimmäisessä kohteessa jälkikaiunta-aika on suurin. Kohteessa on kuitenkin valmiiksi oivallinen sijoituspaikka vaimennusmateriaalille. Olohuoneen katossa on upotettuja valaisimia, joten kattoon kiinnittäminen ei tule kysymykseen. Sen sijaan yksi seinä on tehty alkamaan vasta toisesta kerroksesta ja siinä ei ole erityisiä ulokkeita tms. vaikeuttamassa asennusta. Tämän lisäksi kyseessä on vinon katon korkea pääty, johon heijastuu siis kaikki alhaalta kantautuva ääni, joten paikka on siis varsin hyvä. Seinään kiinnitys voidaan tehdä joko liimaamalla, jolloin tulos on kohtuullisen hyvä, taikka listoilla, jolloin levyjen taakse saadaan ilmaväli ja vaimennuskyky kasvaa. Tässä tapauksessa listoitusta voitaisiin tehdä kaiken lisäksi hiukan vinoon, jolloin ilmavälin koko muuttuu ja vaimennusta saadaan laajemmalle taajuusalueelle – myös vaikeasti vaimennettavalle bassoalueelle. Listoitusta on kuitenkin hankala toteuttaa ja se ei ole kovinkaan hyvän näköinen. Seinään päätetään liimata 9 m<sup>2</sup> 40 mm paksua akustiikkalevyä.

Olohuoneessa roikkuvat myös korkeat verhot ikkunoiden vieressä peittäen osaksi seinää. Mahdollista on nyt myös asentaa näiden verhojen taakse muutama neliö vaimennusmateriaalia, jolloin se jää katsojalta piiloon, mutta se silti vaikuttaa huoneen äänikenttään. Verhojen taakse seinälle liimataan 5,4 m<sup>2</sup> samaa 40 mm paksua akustiikkalevyä.

Koska tila on avoin, ja muutkin huoneiston tilat ovat varsin kaiuntaisia, kannattaa vaimennusmateriaalia laittaa muuallekin. Olohuoneen eristäminen muusta huoneistosta akustoinnin nimissä ei ole järkevää. Olohuoneeseen yhteydessä oleva ruokailutila on myös hyvä sijoituspaikka vaimennusmateriaalille. Samoin on yläkertaan vievän portaikon katto sekä yläkerran aulatilat katto. Näihin kaikkiin sijoitettuna vaimennusmateriaalia saataisiin melko paljon, ja olohuoneessa vaikuttava jälkikaiunta-aika pieneneisi radikaalisti. Ruokailutilan seinään 40 mm paksua akustiikkalevyä asennetaan n. 2,4 m<sup>2</sup>. Yläkerran aulatilat seinälle samaa levyä tulee 5,76 m<sup>2</sup>. Osa pinta-aloista on arvioita siksi, että joitain asennettuja levyjä on leikeltävä.

Koska olohuoneeseen yhteydessä olevien tilojen yhteenlasketun tilavuuden ja sen vaikutuksen määrittäminen on äärimmäisen vaikeaa, arvioidaan asennettavan vaimennusmateriaalin vaikutusta käyttämällä laskuissa ainoastaan olohuoneen tilavuutta, joka on  $150,84 \text{ m}^3$ . Mitatun jälkikaiunta-ajan ollessa  $1,1 \text{ s}$ , voidaan laskea tilassa jo oleva absorptioala käyttämällä Sabinein kaavaa (6).

$f$ (Hz)	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
$T_{60}$ (s)	1,0	1,1	1,0	1,1	1,2	1,0
$A_h$ ( $\text{m}^2$ )	24,13	21,94	24,13	21,94	20,11	24,13

**Taulukko 5.5** Kohteessa 1 lasketut absorptioalat taajuuskaistoittain

Asennuksen jälkeistä jälkikaiunta-aikaa voidaan nyt pyrkiä laskemaan käyttäen taulukon 5.5 tietoja hyväksi. Kun tiedetään asennuksessa käytettävän tuotteen absorptiokerroin taajuuskaistoittain sekä asennettava pinta-ala, voidaan niistä laskea lisättävä vaimennusmateriaalin absorptioala kaavalla (7), lisätä se edellä laskettuun huoneen absorptioalaan ja sijoittaa tulos Sabinein kaavaan (6). Tuloksena saatu uusi jälkikaiunta-aika ei välttämättä täysin pidä paikkaansa, koska käytännössä on jätetty huomioimatta olohuoneeseen kytköksissä olevat muut huonetilat, mutta se antaa suuntaa saatavasta arvosta, sekä auttaa arvioimaan tarvittavan materiaalin määrää.

Kohteissa käytettävä vaimennusmateriaali on Saint-Gobain Ecophon Oy:n, 40 mm paksua Master Alpha-levyä, jonka absorptiokertoimet taajuuden mukaan on listattu taulukkoon 5.6 [8]. Levy kuuluu standardinmukaisessa [13] luokituksessa A-luokkaan.

$f$ (Hz)	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
$\alpha_{\text{master}}$	0,2	0,75	1	1	0,95	0,95

**Taulukko 5.6** Ecophon Oy Master Alpha-levyn vaimennuskerroin taajuuksittain

Edellä mainittujen asennettavien levyjen yhteispinta-ala on  $22,56 \text{ m}^2$ . Kaikkia asennuksia ei tehdä olohuoneeseen, mutta kaikki asennukset varmasti vaikuttavat myös olohuoneen äänikenttään. Käytetään laskennassa olohuoneeseen asennettavien levyjen pinta-alaa, joka on  $9 \text{ m}^2 + 5,4 \text{ m}^2 = 14,4 \text{ m}^2$ . Kerrotaan se taajuuskaistoittain akustiikkalevyn absorptiokertoimella ja lisätään saatu absorptioala  $A_1$  taulukossa 5.5 olevaan huoneen absorptioalaan  $A_h$ . Lasketaan lopuksi uutta absorptioalaa käyttäen Sabinein kaavalla (6) uusi jälkikaiunta-aika taulukkoon 5.7.

$f$ (Hz)	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
$A_1$ (m <sup>2</sup> )	2,88	10,8	14,4	14,4	13,68	13,68
$T_{60}$ (s)	0,9	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6

**Taulukko 5.7** Asennetun 16m<sup>2</sup> levyn absorptioala ja laskettu uusi jälkikaiunta-aika

Laskelmien perusteella olohuoneen ääniolosuhteet muuttuvat huomattavasti paremmiksi. Ainoastaan pienillä taajuuksilla jää jälkikaiunta-aika lähelle sekuntia. Tulosten perusteella vaimennusmateriaalia voisi laittaa hieman enemmänkin, mutta tällä kertaa niin ei tehdä ulkonäkösyistä.

### 5.3.2 Kohde 2

Toisessa kohteessa pitkän jälkikaiun lisäksi ongelmana on myös tärykaiku, joka on erittäin selkeästi huomattavissa yläkerran aulassa. Täten vaimennusmateriaalin sijoittelu on hyvin ratkaisevaa. Tässäkin kohteessa katossa on valaisimia, mutta silti sinne voidaan sijoittaa osa vaimennusmateriaalista. Muita mahdollisia paikkoja materiaalille ovat seinien yläosat, portaikko, yläkerran aula/käytävä sekä alakerran eteinen ja tuulikaappi. Koska tässäkin kohteessa olohuonetta ei voida eristää ovilla muista tiloista, on vaimennusta laitettava muihinkin tiloihin.

Asennettuun levymäärään ja sen sijaintiin vaikuttavat ensisijaisesti ulkonäköseikat. Asennuksia päätetään tehdä seuraavasti. Olohuoneen kattoon (oikeammin asennuspaikka on jo yläkerran aulan puolella, mutta selkeästi samaa tilaa olohuoneen kanssa) liimataan 6,48 m<sup>2</sup> 40 mm paksua akustiikkalevyä. Olohuoneen seiniin liimataan lisäksi n. 3,6 m<sup>2</sup> 40 mm paksua levyä sekä n. 8,6 m<sup>2</sup> 20 mm paksua levyä. Myös portaikon seinään liimataan 20 mm paksua levyä ja sitä tulee 2,16 m<sup>2</sup>. Ohuempi levy on Saint-Gobain Ecophon Oy:n Focus-levy ja paksumpi samaa Master-levyä kuin kohteessa 1.

Laskennassa käytetään olohuoneeseen asennettujen levyjen pinta-aloja. Tässä tapauksessa on tulkinnanvaraista, mitkä levyt tulisi ottaa mukaan laskentaan. Päätetään ottaa laskennassa kaikki muut asennukset huomioon paitsi portaikon seinään asennettavat levyt, jotka ovat vähiten tekemisissä olohuoneen äänikentän kanssa. Täten asennettua 40 mm paksua levyä on yhteensä n. 10,1 m<sup>2</sup> ja 20 mm paksua levyä n. 8,6 m<sup>2</sup>.

Master-levyn absorptiokertoimet on esitelty aiemmin taulukossa 5.6. Seuraavassa taulukossa 5.8 on ensin olohuoneen jälkikaiunta-aika ennen asennuksia, sitten olohuoneen laskettu absorptioala, Focus-levyn absorptio-

kertoimet [8], asennettujen Focuksen ja Masterin tuottama absorptioala sekä uuden jälkikaiunta-ajan laskettu tulos taajuuskaistoittain.

$f$ (Hz)	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
$T_{60}$ (s)	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,7
$A_h$ (m <sup>2</sup> )	19,25	17,11	19,25	17,11	19,25	22,00
$\alpha_{\text{focus}}$	0,1	0,3	0,8	1	1	0,85
$A_1$ (m <sup>2</sup> )	2,88	10,16	17,00	18,70	18,12	16,91
$T_{60}$ (s)	0,7	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4

**Taulukko 5.8** Huoneen jälkikaiunta-aika, huoneen absorptioala, Focus-levyn absorptiokertoimet, asennettujen levyjen aiheuttama absorptioala, sekä laskettu uusi jälkikaiunta-aika taajuuskaistoittain.

Laskennan perusteella jälkikaiunta-aika muuttuu huomattavasti pienemmäksi. Olosuhteiden muuttuminen pitäisi siis olla selkeästi aistittavissa ja sen pitäisi näkyä mittaustuloksissa. Tulosten mukaan asennusmäärän pitäisi olla riittävä ja sijoittelukin vaikuttaa hyvältä.

### 5.3.3 Kohde 3

Kolmannessa kohteessa etuna on muihin kohteisiin verrattuna se, että yläkertaan ei ole suoraa yhteyttä olohuoneesta, vaan ainoastaan portaikon kautta. Keittiö sen sijaan on melkoisen kaikuisa lukuisten kovien pintojensa vuoksi, ja se on suorassa yhteydessä olohuoneeseen. Erityisesti tässä kohteessa varmasti suurta apua äänimaailmaan toisi ovi, jolla voitaisiin sulkea suora yhteys keittiöön. Se ei ole mahdollista, sillä oviaukko on suuri ja sen sulkeminen muuttaisi tilan tuntua huomattavasti. Lisäksi huoneiden välissä olevaa takkaa ei ole muurattu kattoon asti, joten sen yläpuolella on myös ilmapäli. Keittiön erottaminen olohuoneesta ilman perustavanlaatuisia muutoksia talossa on siis mahdotonta.

Toisena vaihtoehtona olisi akustoida koko keittiö ja osittain muita tiloja lähinnä alakerrasta. Tällä kertaa kuitenkin tyydytään ratkaisuun, jossa ainoastaan lisätään vielä hieman vaimennusmateriaalia olohuoneeseen ja jätetään keittiön akustointi seuraavaan kertaan. Lisäys tehdään 30 mm paksuisilla Saint-Gobain Ecophon Oy:n Jazz-levyillä, jotka sijoitetaan seinäpinnalle verhojen taakse piiloon. Levy kuuluu standardinmukaisessa [13] luokituksessa C-luokkaan. Levyjä asennetaan 6,13 m<sup>2</sup>.

Seuraavassa taulukossa 5.9 ovat huoneen jälkikaiunta-aika ennen asennuksia, huoneen absorptioala, asennetun levyn absorptiokertoimet [8], sen aiheuttama absorptioala sekä uuden jälkikaiunta-ajan arvio taajuuskaistoittain.

$f$ (Hz)	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
$T_{60}$ (s)	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7
$A_h$ (m <sup>2</sup> )	20,94	17,95	15,71	15,71	15,71	17,95
$\alpha_{jazz}$	0,05	0,3	0,75	0,95	1	1
$A_l$ (m <sup>2</sup> )	0,43	1,96	4,47	5,76	6,13	6,13
$T_{60}$ (s)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5

**Taulukko 5.9** Huoneen jälkikaiunta-aika ja absorptioala ennen asennuksia, Jazz-levyn (30 mm) absorptiokertoimet, 6,13 m<sup>2</sup>:n absorptioala sekä uusi jälkikaiunta-aika taajuuskaistoittain.

Asennettavan määrän ollessa pieni ei muutos välttämättä ole suuri. Laskennallisesti kuitenkin saataisiin jälkikaiunta-aikaa lyhenemään 0,2 sekunnilla. Voidaankin siis olettaa muutoksen näkyvän myös mittaustuloksissa. Mikäli taulukoitu tulos pitää paikkansa, olisi se erittäin hyvä, sillä jälkikaiunta-aika olisi todella tasainen koko kaistalla ja sen arvo olisi suositusten rajoissa. Arvioidaan siis asennusmäärän ja -paikan olevan hyviä.

## 6 TULOKSET

Kohteissa tehtiin edellisessä luvussa esiteltyt muutostoimenpiteet. Vaimennusmateriaalin asennuksen tekivät asukkaat itse. Tässä luvussa esitellään asennusten jälkeen uudelleen mitatut olohuoneiden jälkikaiunta-ajat. Saatuja mittaustuloksia verrataan annettuihin tavoitteisiin sekä laskettuihin tuloksiin ja samalla tarkastellaan ulkonäköseikkoja asukkaiden havaintojen pohjalta. Lopuksi pohditaan jatkotoimenpiteitä kohteissa.

### 6.1 Uudet mittaustulokset

Toisella mittauskerralla käytössä oli eri laitteisto kuin ensimmäisellä kerralla. Analysaattorina ja kohinageneraattorina toimi 1-kanavainen Norsonicin taskuanalysaattori NOR-118. Kohinasignaali ohjattiin vahvistimeen Yorkville 50B Bass Amp. Signaalin talteenotto tapahtui mikrofoniolla Norsonic type 1206/30490. Tällä kertaa analysaattorista saatiin tuloksia aiempaa pienemmällä taajuuskaistalla 50-5000 Hz, joten vertailu tämän kaistan ulkopuolella ei tule kysymykseen. Vertailu ei sinänsä ole tarpeenkaan, sillä mitattu kaista sisältää standardien vaatiman alueen. Mittaukset suoritettiin samalla tavalla kuin ensimmäisellä kerralla. Kaiutinpaikat olivat samat (2 kpl) ja mikrofoni- paikkoja oli taas 8 kpl. Jokaisella mikrofoni- paikalla tehtiin 2 mittausta, joten yhteensä saatiin jälleen 32 kpl tuloksia. Ulkolämpötila oli n. 15-20 °C ja ilmankosteutta ei tälläkään kertaa mitattu. Vaikka ilmankosteutta ei mitattukaan, voidaan kuitenkin olettaa sen mahdollisen eroavaisuuden eri mittausten välillä vaikuttavan melko vähän tuloksiin huoneiden tilavuuksien ollessa suhteellisen pieniä. Samoin lämpötilaerojen ollessa melko pieniä, ei niidenkään vaikutusta huomioida tuloksia laskettaessa. Analysaattorin antamista tuloksista osa oli varustettu kysymysmerkillä, joka ilmoitti mittaustuloksen sisältävän tavallista suurempaa epävarmuutta. Lisäksi, kuten ensimmäisissä mittauksissa, saatiin tälläkin kertaa myös hieman enemmänkin keskiarvosta poikkeavia tuloksia. Näitä mahdollisesti virheellisiä tuloksia vertailtiin laskennassa keskiarvoihin, mutta kuten aiemminkin jo todettiin, niillä ei ollut tutkitulla kaistalla suurtakaan merkitystä. Lopullisten tulosten laskennassa hylättiin mittalaitteen epävarmana pitämät arvot.

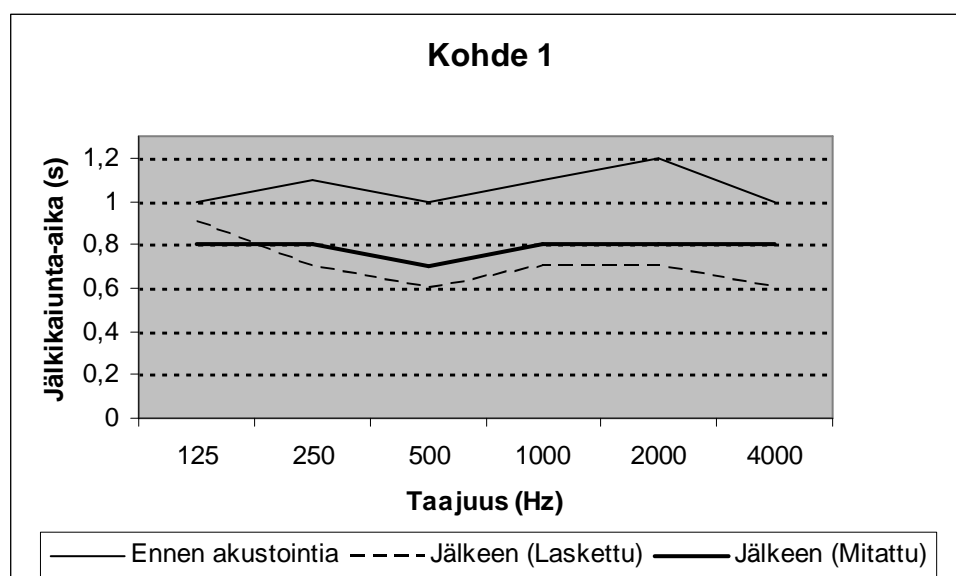
Muutokset mittaustuloksissa ensimmäisiin mittauksiin verrattuna olivat huomattavia kohteissa 1 ja 2. Kohteessa 3 havaittiin myös selkeitä muutoksia, mutta koska asennukset olivat vähäisempiä, oli muutos tuloksessakin pienempää. Kohteen 1 uusi jälkikaiunta-aika on 0,8 s, joten parannusta on tapahtunut 0,3 s. Taajuuskaistakohtainen esitys on taulukossa 6.1.

$f$ (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
$T_{60,a}$ (s)	1	1,1	1	1,1	1,2	1
$T_{60,l}$ (s)	0,9	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6
$T_{60,m}$ (s)	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8

**Taulukko 6.1** Aluksi mitattu  $T_{60,a}$ , laskettu  $T_{60,l}$  sekä lopuksi mitattu  $T_{60,m}$  jälkikaiunta-aika taajuuskaistoittain kohteessa 1.

Muutos oli varsin suuri, vaikka laskettuja arvoja ei saavutettukaan. Jälkikaiunta-aika putosi jopa 0,4 sekuntia 2000 Hz:n oktaavikaistalla. Muillakin kaistoilla pudotus on huomattava. Ajan voidaan huomata myös tasoittuneen taajuuden suhteen siten, että se on koko tarkasteltavalla alueella 0,1 sekunnin sisällä. Tarkemmalla taajuuskaistakohtaisella tarkastelulla (Liite B) huomataan, että alueilla 100-300 Hz sekä 1000-5000 Hz jälkikaiunta-aika on hieman suurempi kuin muualla. Nousu ei kuitenkaan ole suhteettoman suurta. Huonemoodien aiheuttamia piikkejä ei kuvaajassa ole havaittavissa ja kaiutinpaikkojen väliset erotkin ovat hyvin pieniä. Mikäli jatkotoimenpiteisiin ryhdytään ja päätetään asentaa lisävaimennusta, kannattaa suunnittelu aloittaa em. taajuuskaistoista. Kaistaa 1000-5000 Hz on helppo käsitellä. Lähes kaikki huokoiset vaimennusmateriaalit toimivat hyvin juuri sillä taajuusalueella. Alue 100-300 Hz on hieman vaikeampi vaimentaa ja siihen tarvitaan yksilöllisempiä ratkaisuja.

Jälkikaiunta-aika on siis nyt annettujen suositusten (0,5-0,8 s) ylärajalla, joten pientä parannusta voisi vielä tehdä. Kuitenkin nyt aikaansaatu muutos on sen verran suuri, että selkeä parannus on jo saatu luotua ja tulokseen voidaan olla tyytyväisiä.



**Kuva 6.1** Jälkikaiunta-aika kohteessa 1.

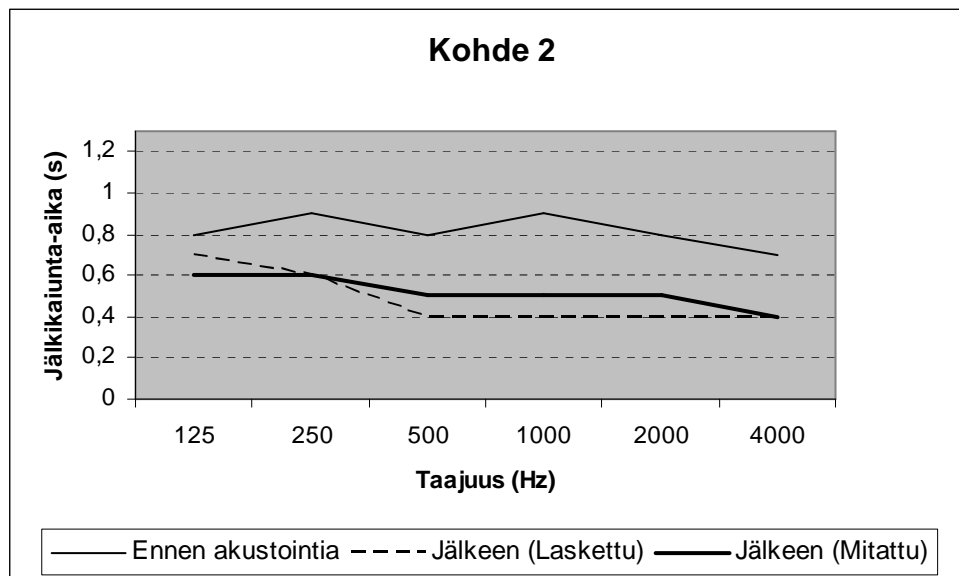
Kohteessa 2 uusi jälkikaiunta-aika on 0,5 s. Se on siis laskenut alkutilanteesta 0,3 s. Tulokset ovat esitetty taajuuskaistoittain taulukossa 6.2.

$f$ (Hz)	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
$T_{60,a}$ (s)	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,7
$T_{60,l}$ (s)	0,7	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4
$T_{60,m}$ (s)	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4

**Taulukko 6.2** Aluksi mitattu  $T_{60,a}$ , laskettu  $T_{60,l}$  sekä lopuksi mitattu  $T_{60,m}$  jälkikaiunta-aika taajuuskaistoittain kohteessa 2.

Kuten taulukosta nähdään, muuttui jälkikaiunta-aika myös tässä kohteessa 1000 Hz:n oktaavikaistalla jopa 0,4 sekuntia. Myös alussa mainitut pahat tärykaiut katosivat kokonaan, sillä asennukset tehtiin juuri ongelma-alueille. Jälkikaiunta-ajan arvo on nyt huomattavasti parempi kuin lähtötilanteessa. Myös taajuuskaistoittain ajateltuna aika on hiukan luonnollisempi, sillä nyt se on tasaisempi ja laskee tai pysyy samana koko ajan taajuuden kasvaessa. Kuunteluhuonestandardien suosituksiin saakka ei sentään päästä, mutta niihin ei olohuoneissa tarvitsekaan pyrkiä.

Kun tuloksia tarkastellaan tarkemmin (Liite B), nähdään, että myös kaiutinpaikkojen väliset erot ovat melko pieniä yli 200 Hz:n alueella. Sitä pienemmillä taajuuksilla erot kasvavat hieman. Myöskään mitään erityisen suuria huonemoodien aiheuttamia piikkejä ei kuvaajassa näy, joten tulokset vaikuttavat kaikin puolin hyviltä. Jälkikaiunta-ajalle asetettu tavoitearvo saavutettiin, joten teknisesti kohteen parannus onnistui.



**Kuva 6.2** Jälkikaiunta-aika kohteessa 2.



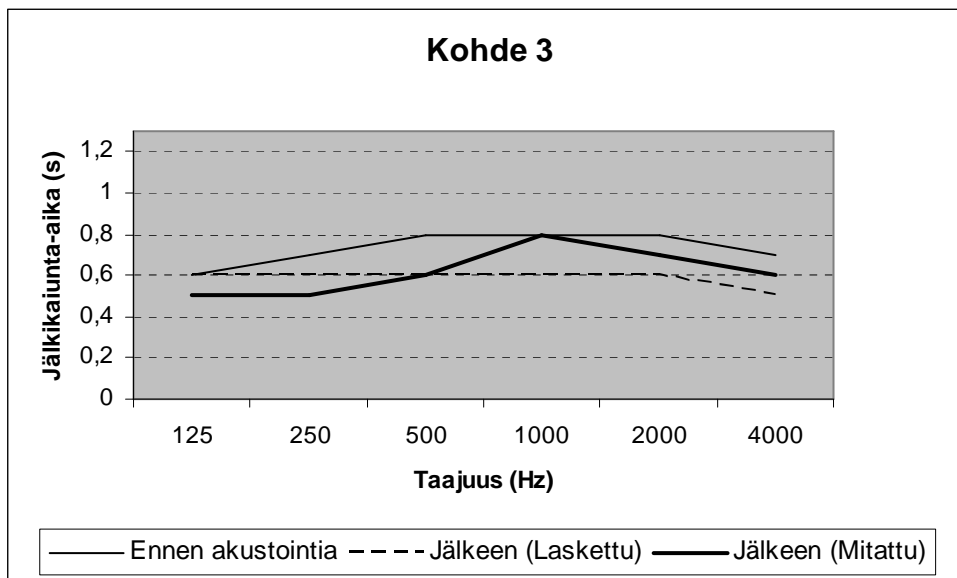
Kolmannessa kohteessa uusi jälkikaiunta-aika on 0,7 s. Myös tässä kohteessa tulokset muuttuivat selkeästi, vaikka asennusmäärä oli pieni. Muutosta aiempaan on 0,1 s. Taajuuskaistoittain tulokset ovat taulukossa 6.3.

$f$ (Hz)	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
$T_{60,a}$ (s)	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7
$T_{60,l}$ (s)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
$T_{60,m}$ (s)	0,5	0,5	0,6	0,8	0,7	0,6

**Taulukko 6.3** Aluksi mitattu  $T_{60,a}$ , laskettu  $T_{60,l}$  sekä lopuksi mitattu  $T_{60,m}$  jälkikaiunta-aika taajuuskaistoittain kohteessa 3.

Tulos on tyydyttävä ja ehkä hieman yllättävä. Muutos jälkikaiunta-ajassa jäi laskelmiin nähden odotettua pienemmäksi. 1000 Hz:n oktaavikaistalla se nousee yllättäen jopa 0,8 sekuntiin ja vaikuttaisi, että tällä taajuusalueella parantumista ei ole tapahtunut lainkaan. Uusia mittauksia tehdessä verhoja ei oltu vielä asennettu paikalleen, mutta koska ne eivät ole kovinkaan massiiviset, tulos tuskin siitä suuresti muuttuu. Mikäli olosuhteita lähdetään vielä parantelemaan, on ongelma kuitenkin sinänsä helppo, koska matalien taajuuksien vaimennus on jo kunnossa.

Tarkemmat tulokset ovat liitteessä B. Niistä nähdään jälleen, että tulokset ovat suurempia kaiutinpaikalla 2 kuin kaiutinpaikalla 1. Voidaankin olettaa, että koska jälleen KP2 oli lähellä oviaukkoa, sen tulokset eivät ole niin hyvin huonetta kuvaavia kuin KP1:n. Täten mittaustulokset ovat hieman korkeammat kuin mitä todelliset arvot olisivat. Ero mittauspaiikkojen välillä on kuitenkin sen verran pieni, että tulos muuttuisi korkeintaan 0,1 s.



**Kuva 6.3** Jälkikaiunta-aika kohteessa 3.

Korostus 1000 Hz:n kohdalla on epäjohdonmukainen. Asennetun vaimennusmateriaalin tulisi teoriassa toimia erittäin hyvin kyseisellä taajuusalueella ja huonommin taas esimerkiksi 250 Hz:n kohdalla, jossa jälkikaiunta-aika on taas laskenut 0,2 s. Yksi syy tulokseen voi olla jonkinlainen mittausrvirhe. Tätä on kuitenkin hyvin vaikea todentaa ilman uusia mittauksia, joita ei tämän työn puitteissa voida suorittaa. Toisena vaihtoehtona on jokin talon rakenteen tai huonekalun resonanssi, joka aiheuttaa jälkikaiunta-ajan kasvun. Mittausta tehdessä huomio kiinnittyi kohinan katketessa korkeataajuiseen sointiin, joka vaimeni huomattavasti kohinaa hitaammin. Soinnin lähdettä yritettiin tuloksetta selvittää molemmilla mittauskerroilla. Se kuitenkin kuulosti joltakin metalliselta putkelta tms. ja saattoi olla syynä kummallisiin mittaustuloksiin. Tämän kaltaisen resonanssin tosin pitäisi aiheuttaa tuloksiin selkeä kapeakaistainen piikki laajakaistaisen korostuksen sijasta.

Kaikissa olohuoneissa päästiin alussa asetettuun tavoitteeseen jälkikaiunta-ajalle, joka siis oli 0,5-0,8 s. Laskennalliset tulokset saavutettiin ainoastaan osittain. Tämä ei kuitenkaan ole erikoista, sillä laskuissa on tehty paljon yksinkertaistuksia. Aiemmin luvussa 2.1.2 todettiin, että Sabine kaava (6) antaa laskettaessa yleensä hieman liian pieniä arvoja jälkikaiunta-ajalle. Sama huomattiin tässäkin työssä. Ero mittaustulokseen ei kuitenkaan ole kovinkaan suuri. Lähes koko ajan lasketun ja mitatun tuloksen erotus on 0,1 sekunnin luokkaa. Joissain tapauksissa käydään hetkellisesti 0,2 sekunnin erotuksessa. Tosin, jos tämä suhteutetaan akustoinnin tuottamaan muutokseen jälkikaiunta-ajassa (maksimissaan 0,4 s), on erotus tällöin huomattavampi.

## **6.2 Asukkaiden havainnot**

Kaikkien asukkaiden mielestä muutokset taloissa olivat huomattavia. Osalla odotukset jopa ylittyivät. Akustiseen vaikutukseen oltiin erittäin tyytyväisiä. Häiritsevä kaiunta sekä huoneen yleinen äänekkyyys oli laskenut tuntuvasti ja huoneessa oli nyt miellyttävämpää olla. Myös kaikenlaiset hälyäänet olivat poistuneet ja puhe sekä TV:n ääni olivat nyt selkeämpiä.

Ulkonäköseikoissa sanottiin olevan hieman parantamisen varaa, mutta valtaosa asennuksista oli kuitenkin todella onnistuneita ja hyvännäköisiä, ja niihin oltiin tyytyväisiä. Suurin osa negatiivisista kommentteista keskittyi omaan työnjälkeen sekä värisävyihin, mutta jälkiparanteluideoitakin oli jo valmiina. Kukaan asukas ei katunut päätöstä kohentaa olohuoneensa akustiikkaa erillisellä vaimennusmateriaalilla. Kuvia asennuksista on liitteessä C.

Kaikki osapuolet olivat sitä mieltä, että akustiikka-asioita tulisi pohtia jo talon suunnittelu- ja rakennusvaiheessa. Tällöin suurimmat sudenkuopat vältettäisiin ja vaimennusmateriaalit sekä muut ratkaisut saataisiin integroitua rakenteisiin mahdollisimman huomaamattomasti. Jälkikäteen akustointikin on kuitenkin selkeästi parempi vaihtoehto kuin ongelman ratkaisematta jättäminen. Huoneakustiikkaongelmat koetaan suuriksi ja niitä uskotaan kokemusten perusteella olevan nykyään yhä useammassa uudessa kodissa.

### **6.3 Tulosten arviointi**

Kaikenkaikkiaan tulosten ja asukkaiden kommenttien valossa akustointiprojekti vaikuttaisi onnistuneen melko hyvin jokaisessa kohteessa. Jälkikäytäntö-aika parani jokaisella, monet muut ääneen liittyvät ongelmat katosivat ja palaute oli pääasiassa hyvää. Mitatut tulokset poikkesivat jonkin verran lasketuista. Se olikin odotettavissa lukuisien yksinkertaistusten johdosta. Laskentaa ei kokeiltu tehdä uuden SEA-malliin pohjautuvan menetelmän [12] kautta. Selvittämättä siis jäi, olisiko menetelmä ollut tarkempi myös tässä tapauksessa.

Mittaustulosten lisäksi huomio kiinnittyi annettuun palautteeseen. Pelkkä olohuoneen akustointi tuo jo merkittävän parannuksen olosuhteisiin, mutta se samalla korostaa muiden tilojen ongelmia. Kun akustoidussa olohuoneessa puhutaan, jää avoimien ovien kautta kulkeutuva ääni kaikumaan muihin huoneisiin, kuten esimerkiksi keittiöön. Myös huoneesta toiseen siirtyminen ja samalla puhuminen havahduttaa tilojen suureen eroon. Tästä johtuen olohuoneen akustointi herättääkin tarpeen myös muiden tilojen akustointiin. Mikäli siis ääniolosuhteita aiotaan parantaa olohuoneessa, on syytä harkita samalla myös muiden ongelmallisten tilojen akustointia. Kaikkein halvin ja paras vaihtoehto on suorittaa akustointi jo rakennusvaiheessa. Mikäli se kuitenkin tehdään vasta myöhemmin ja ongelmia ei ole ainoastaan olohuoneessa, kannattaa muidenkin tilojen parantelua harkita samalla. Se on helpompaa ja halvempaa kuin erikseen eri kerroilla tekeminen.

Pientalon akustoinnissa on aina haettava kompromissia teoreettisesti pätevän ja käytännöllisen sekä taloudellisesti järkevän ratkaisun välillä. Tässä työssä raamit olivat jo etukäteen tiukat ja siten toteutuksessa ei ollut kovinkaan suurta liikkumavaraa. Tuloksissa kuitenkin nähdään se, mitä näinkin yksinkertainen suunnittelu saa aikaan huoneen akustiikassa.

## 6.4 Jatkotoimenpiteet kohteissa

Kohteessa 1 oltiin akustoinnin näyttävyyteen varsin tyytyväisiä. Ainoa negatiivinen asia oli akustiikkalevyjen värisävy, joka ei aivan täsmännyt seinän väriin. Asukkaat jäivät siten pohtimaan mahdollista pintakäsittelyä tai verhoilua levyille. Tässä kohteessa oli asennusten jälkeen korkein jälkikaiunta-aika. Se oli kuitenkin asukkaiden mielestä niin paljon lähtötilannetta parempi, että siihen oltiin tyytyväisiä. Mikäli jonkin ajan totuttelun jälkeen huone alkaa tuntua vieläkin liian kaikuisalta ja äänekkäältä, on tilassa todennäköisesti vielä helppo löytää lisää paikkoja lisävaimennusmateriaalille.

Kohteessa 2 oli akustoinnin jälkeen pienin jälkikaiunta-aika. Tila myös tuntui hyvin vaimennetulta. Etenkin yläkerrassa vaimennusta on jo varmasti tarpeeksi. Ero aulan ja muiden tilojen välillä yläkerrassa tuntuu sen verran suurelta, että mahdollisesti voisi olla järkevää jopa vaimentaa hiukan muitakin huoneita. Alakerrassakin olohuoneen ääniympäristö tuntuu nyt luontevalta, ja mittaukset puhuvat sen puolesta. Sielläkin lisävaimennusta voisi harkita ympäröiviin tiloihin ja niistä lähinnä keittiöön, joka tuntuukin olevan jokaisessa kohteessa vaikein tila hallita.

Kohteessa 2 ei myöskään oltu täysin tyytyväisiä ulkonäköseikkoihin, joten niihinkin kannattanee puuttua vielä. Suurinta tyytymättömyyttä aiheutti ikkunaseinälle asennetut 600 mm x 600 mm akustiikkalevyt. Yksi vaihtoehto olisi vaihtaa ne suurempiin, 600 mm x 1200 mm kokoisiin levyihin, jolloin shakkiruudukkomainen tunne katoaisi. Levyt saisi myös kätevästi piiloon eteen asennettavilla verhoilla ja muitakin ratkaisuja varmasti on.

Kohteessa 3 oltiin olohuoneeseen erittäin tyytyväisiä, joten siellä jatkoparannuksia tuskin juurikaan tehdään. Nyt asennettuja levyjä peittämään oli vielä tulossa verhot, joita ei oltu ehditty asentamaan mittauksiin mennessä. Kohteen jälkikaiunta-ajassa on vielä vähän toivomisen varaa, mutta asukkaiden palaute oli erittäin positiivisia. Havaittavaksi ongelmaksi muodostui keittiön ääniolosuhteiden huonous, joka korostui olohuoneen asennusten jälkeen. Keittiön äänimaailman saattaminen hyväksi ei tule olemaan helppoa, mikäli sitä yritetään, sillä kyseisen tilan lattia on laatoitettu ja katto on panelia. Seinilläkään ei juuri ole kaappien takia ylimääräistä tilaa ja huoneeseen ei ole mielekästä laittaa pehmeitä kalusteita, joten luultavasti ainoaksi vaihtoehdoksi jäisi katon purkaminen ja panelien korvaaminen akustiikkakatolla.

## 6.5 Jatkotutkimukset

Tässä työssä käytetty teoria on laajalti tunnettua, eikä siinä ei ole tänä päivänä suuria ongelmia jotka vaatisivat selvitystä. Sen sijaan teorian saattaminen suuremman ihmisjoukon tietoisuuteen on hyvinkin haasteellista. Akustoinnista saatava hyöty on asiaa tuntemattomalle melko abstraktia ilman käytännön esimerkkiä. Työssä mukana olleiden kohteiden asukkaat ovat korkeasti koulutettuja ja heillä oli ennakkoon jo hieman käsitystä akustoinnin tuottamasta hyödystä. Silti yllätyksiäkin koettiin. Akustiikkaan liittyvistä asioista tarvitaan siis lisää yleistietoa, jotta hyviä ääniolosuhteita osataan vaatia. Jotta tietoisuus kasvaisi, tulisi akustiikka-asioiden saada huomattavasti nykyistä enemmän julkisuutta. Selkeitä asiaan liittyviä ja kansantajuisia artikkeleita sekä käytännön esimerkkejä tarvittaisiin. Ongelmat havaitaan yleensä vasta jälkikäteen, koska niiden olemassaolosta ei välttämättä tiedetä ennen omakohtaista kokemusta.

Jokaisesta kohteesta saadun suullisen palautteen mukaan akustiikka-asioita tulisi ottaa enemmän esille pientalojenkin kohdalla jo suunnittelu- ja rakennusvaiheessa. Tämä tarkoittaa nykyistä tiiviimpää yhteistyötä rakennuttajien, arkkitehtien sekä akustiikkakonsulttien välillä. Taloihin kaivattaisiin myös paremmin rakenteisiin integroituvia ratkaisuja, jotka näyttäisivät hyviltä tai olisivat mahdollisimman huomaamattomia. Tuotekehitystä olisi siis tehtävä, ja tuotteita olisi saatava mukaan jo talon suunnitteluvaiheessa. Tällöin vaihtoehtoja erilaisiin toteutuksiin olisi enemmän.

## 7 YHTEENVETO

Työssä lähdettiin liikkeelle pientalojen rakennus- ja huoneakustiikkaan liittyvästä tutkimuksesta. Ajan myötä aihe tarkentui kokeelliselta osalta kivitalojen korkeiden olohuoneiden huoneakustiikkaan, ja teoriaosassa käytiin läpi lisäksi rakennusakustiikkaa. Tarkoituksena oli tehdä tutkimusta ääniolosuhteiden parantamisesta käytännönläheisesti ja samalla suorittaa parannuksia kolmessa kohteessa. Kokeellinen osa aloitettiin esittelemällä kohderakennukset ja mittaamalla niiden olohuoneissa jälkikaiunta-aika. Mittauksissa ja asukkailta kysellessä todettiin, että kohteiden olohuoneissa oli suhteellisen pitkä jälkikaiunta-aika ja ne vaikuttivat olevan kaiuntaisia ja äänekkäitä. Myös muita pienempiä ongelmia havaittiin. Huoneisiin suunniteltiin yhdessä asukkaiden kanssa parannuksia. Tämän jälkeen asennettiin vaimennusmateriaalit. Mittaukset toistettiin ja mittaustulosten perusteella todettiin ongelmien pienentyneen huomattavasti. Myös asukkaiden omien havaintojen perusteella uusiin ääniolosuhteisiin oltiin erittäin tyytyväisiä ja asennuksissa onnistuttiin visuaalisestikin melko hyvin. Palautteen perusteella akustointi kannatti tehdä, koska se paransi asumismukavuutta selkeästi.

Työn mittaukset suorittivat Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy:stä tekniikan ylioppilaat Jussi Rauhala ja Olli Paajanen. Konsultointiapua kohteiden etsinnässä ja mittausten suunnittelussa antoi samasta toimistosta tekniikan lisensiaatti Mikko Kylliäinen.

Kaikenkaikkiaan projekti vaikuttaisi onnistuneen hyvin. Mittaustulokset ovat hyvät ja kohteiden asukkaat pääosin tyytyväisiä. Työssä ratkaistiin konkreettisia ongelmia ja löydettiin epäkohtia sekä aiheita jatkokehittelyyn ja -tutkimukseen. Tunnettua tietoa sovellettiin käytännön ongelmiin, ja teoreettista sekä osittain abstraktia asiaa saatiin ainakin hieman lähemmäs ihmisiä, joille ala on tuntematon. Työssä saatiin myös kasattua yhteen tiiviiseen pakettiin pientaloihin liittyvää olennaisinta huone- ja rakennusakustiikan teoriaa. Siinä käsitellään teorian fysikaalista taustaa, matemaattisia kaavoja, standardinmukaisia mittalukuja sekä tietoa niiden mittaamisesta ja teorian käytännönläheistä soveltamista. Teoria on pyritty selittämään mahdollisimman selkeästi, jotta sitä pystyisi lukemaan mahdollisimman moni. Paljon asiaa jäi myös tämän dokumentin ulkopuolelle, mutta aihetta oli pakko rajata, jotta työn suositeltu laajuus ei ylittyisi eikä työmäärä kasvaisi kohtuuttomaksi.

Alussa työlle asetettiin paljon erilaisia tavoitteita, joista työn edetessä moni osoittautui liian työlääksi toteuttaa tai muuten epäolennaiseksi. Tavoitteita

asetettaessa työn sisältö olikin ehkä hiukan epäselvä ja laaja. Sisältö tarkentui pikkuhiljaa koko suorituksen ajan ja olennaiset asiat nousivat itsestään esiin. Aiheen huomattavan rajaamisen jälkeenkin työssä on sisältöä vielä varsin paljon. Työn odotetaan olevan avuksi kotiensa akustiikan parantamista suunnitteleville ja toteuttaville ihmisille ja sen uskotaan lisäävän heidän tietoisuuttaan kotien akustiikasta sekä akustointimahdollisuuksista. Työn tarkoituksena oli esitellä teoreettista ja käytännön tietoa pientalojen ääniympäristöjen parantamisesta ja kiinnittää alalla olevien tahojen huomiota aiheeseen. Tämän tavoitteen saavuttaminen jää nähtäväksi ja se riippuu paljolti työn esillepanosta ja saatavuudesta.

Jatkossa vaikuttaa siltä, että uusiin taloihin vaaditaan asukkaan puolelta enenevässä määrin hyviä akustisia ominaisuuksia, ja täten ala kasvaisi ja työpaikkojen määrä lisääntyisi. Standardin [4] myötä asuntojen akustinen luokitus ja äänieristysominaisuudet saattavat pikkuhiljaa muuttua myyntivalteiksi, mikäli Suomi seuraa Ruotsin ja Norjan suuntausta [45]. Tämä työ on osaltaan edistämässä tämän suuntaista kehitystä ja aiheen ympärillä käytävää keskustelua.

## LÄHTEET

- [1] Perustuu käytyihin keskusteluihin Markku Hirvosen, Jyrki Kilpikarin, Jussi Jokisen ja Mikko Kylliäisen kanssa.
- [2] <http://www.finlex.fi/>. Luettu 27.3.2006.
- [3] Ympäristöministeriö. 1998. *Suomen rakennusmääräyskokoelma, osa C1: Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa*. 9 s. Helsinki.
- [4] Suomen standardoimisliitto. 2004. SFS 5907. *Rakennusten akustinen luokitus*. 34 s.
- [5] Halme, A. 1976. *Rakennus- ja huoneakustiikka. Meluntorjunta*. Toinen tarkistettu painos 1981. Espoo. Otapaino. 592 s.
- [6] Everest, F. A. 2001. *Master Handbook of Acoustics*. 4<sup>th</sup> ed. NY. McGraw-Hill. 615 s.
- [7] Uosukainen, S. 2006. *Akustinen kenttäteoria, opetusmoniste*. Edita. s. 191-208.
- [8] <http://www.ecophon.fi/>. Luettu 27.3.2006.
- [9] Lahti, T. 1997. *Akustinen mittaustekniikka*. Espoo. Teknillinen korkeakoulu, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Raportti 38. 152 s.
- [10] Rankonen, T. 2002. Materiaalitietokanta ja julkaisut CD-ROM. Tampereen teknillisen korkeakoulun matematiikan raportteja.
- [11] Beranek, L. L.; Vér, L. I. 1992. *Noise and Vibration Control Engineering – Principles and Applications*. NY. John Wiley & Sons Inc. 804 s.
- [12] Nilsson, E.; Andersson, N-Å.; Chigot, P. 2006. *Sound scattering in rooms with ceiling treatment*. Euronoise 2006. Tampere. 6 s.
- [13] Suomen standardoimisliitto. 1997. SFS-EN ISO 11654. Akustiikka. *Rakennuksissa käytettävät absorbentit. Ääniabsorption luokitus*. 11 s.
- [14] Houtgast, T.; Steeneken, H. J. M. 2002. *Past, present and future of the Speech Transmission Index*. TNO Human Factors. 140 s.
- [15] Karjalainen, M. 1999. *Kommunikaatioakustiikka*. Espoo. Teknillinen korkeakoulu, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Raportti 51. 237 s.
- [16] IEC 60268-16. 1988. Sound system equipment - Part 16: *Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*. 28 s.



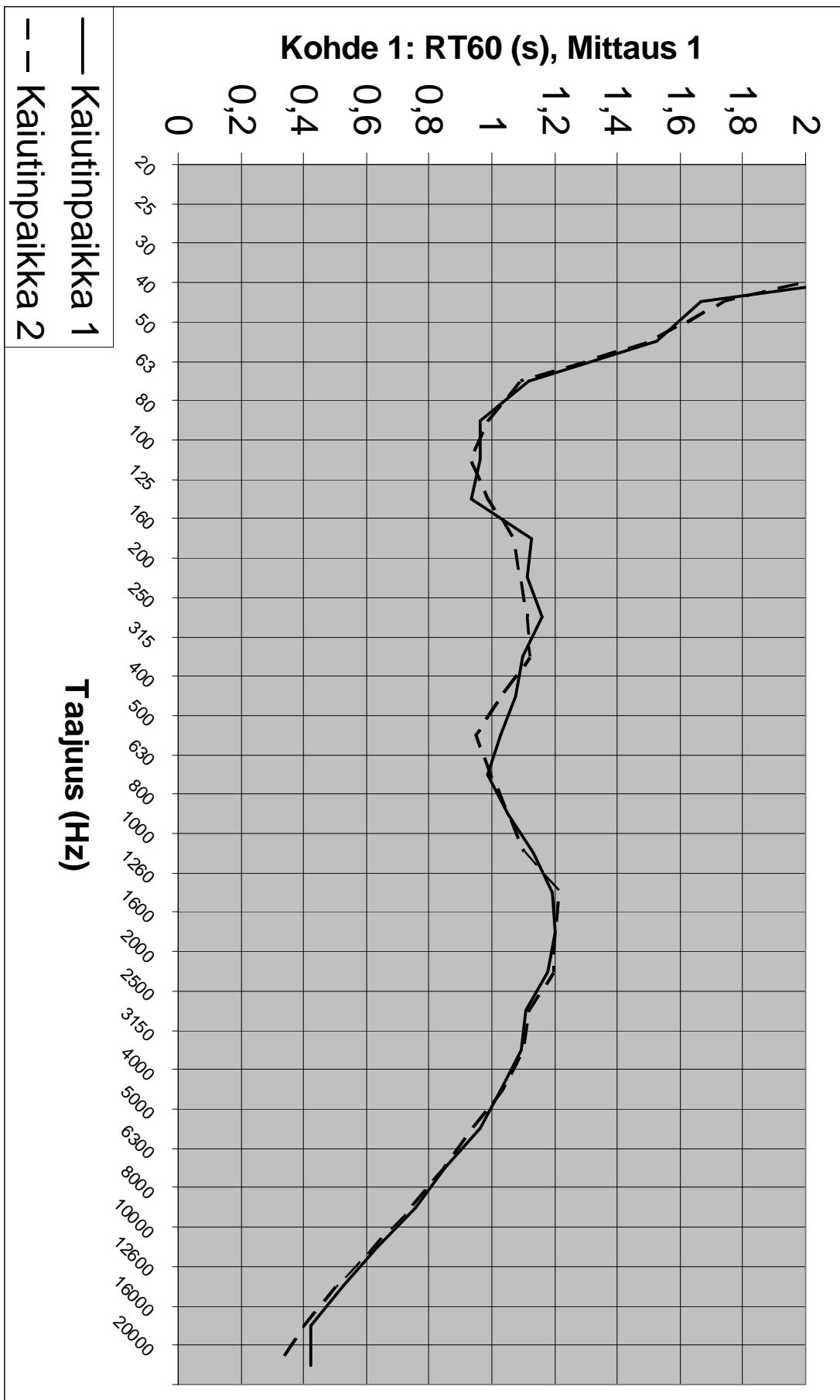
- [17] Steeneken, H. J. M.; Verhave, J.; McManus, S; Jacob, K. 2001. *Development of an Accurate, Handheld, Simple-to-use Meter for the Prediction of Speech Intelligibility*. Reproduced Sound 17. Stratford-on-Avon. 11 s.
- [18] Steeneken, H. J. M.; Houtgast, T. 1985. *A review of the MTF Concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria*. J. Acoust. Soc. Am., vol. 77. s. 1060-1077.
- [19] Steeneken, H. J. M.; Houtgast, T. 1980. *A physical method for measuring speech-transmission quality*. J. Acoust. Soc. Am., vol. 67. s. 318-326.
- [20] Peltonen T. 2000. *A Multichannel Measurement System for Room Acoustics Analysis*. Diplomityö. Espoo. Teknillinen korkeakoulu. 119 s.
- [21] Peltonen, T.; Lahti, T. 2003. *Akustiikkapäivät 2003 Katsaus rakennusten julkisivuäänieristyksen laskentaan ja mitoitukseen*. Akustinen Seura RY. s.17-22.
- [22] Valtioneuvoston päätös 993/1992 melutason ohjeistoista.
- [23] Suomen standardoimisliitto. 1996. SFS-EN ISO 717-1. Akustiikka. *Rakennusten ja rakennusosien ääneneristävyyden luokitus. Osa 1: Ilmaääneneristävyys*. 40 s.
- [24] Halme, A. ja Halme-Salo, E. 2003. *RIL 129 Ääneneristyksen toteuttaminen*. Helsinki. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL RY. 296 s.
- [25] Ympäristöministeriö 2003, *Ympäristöopas 108, Rakennuksen julkisivun ääneneristävyyden mitoittaminen*. 37 s. Helsinki.
- [26] Suomen standardoimisliitto. 1996. SFS-EN ISO 717-2. Akustiikka. *Rakennusten ja rakennusosien ääneneristävyyden luokitus. Osa 2: Askelääneneristävyys*. 32 s.
- [27] Hagberg, K. 2002. 17<sup>th</sup> International Congress on Acoustics. *Ratings adapted to subjective evaluation for impact and airborne sound and its application in building regulations – a literature survey*. Rooma.
- [28] Kylliäinen, M. 2003. Akustiikkapäivät 2003. *Spektrisovitusermien käyttö välipohjien askeläänieristyksen arvioinnissa*. Akustinen seura RY. s. 23-28.
- [29] Kylliäinen, M. 2003. *Uncertainty of impact sound insulation measurements in field*. Lisensiaattityö. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikan laboratorio. Raportti 125. 63 s.
- [30] Kylliäinen, M. 2001. Akustiikkapäivät 2001. *Asuinkerrostalojen äänitekniisen laadun arviointi*. Akustinen Seura RY. s.123-128.

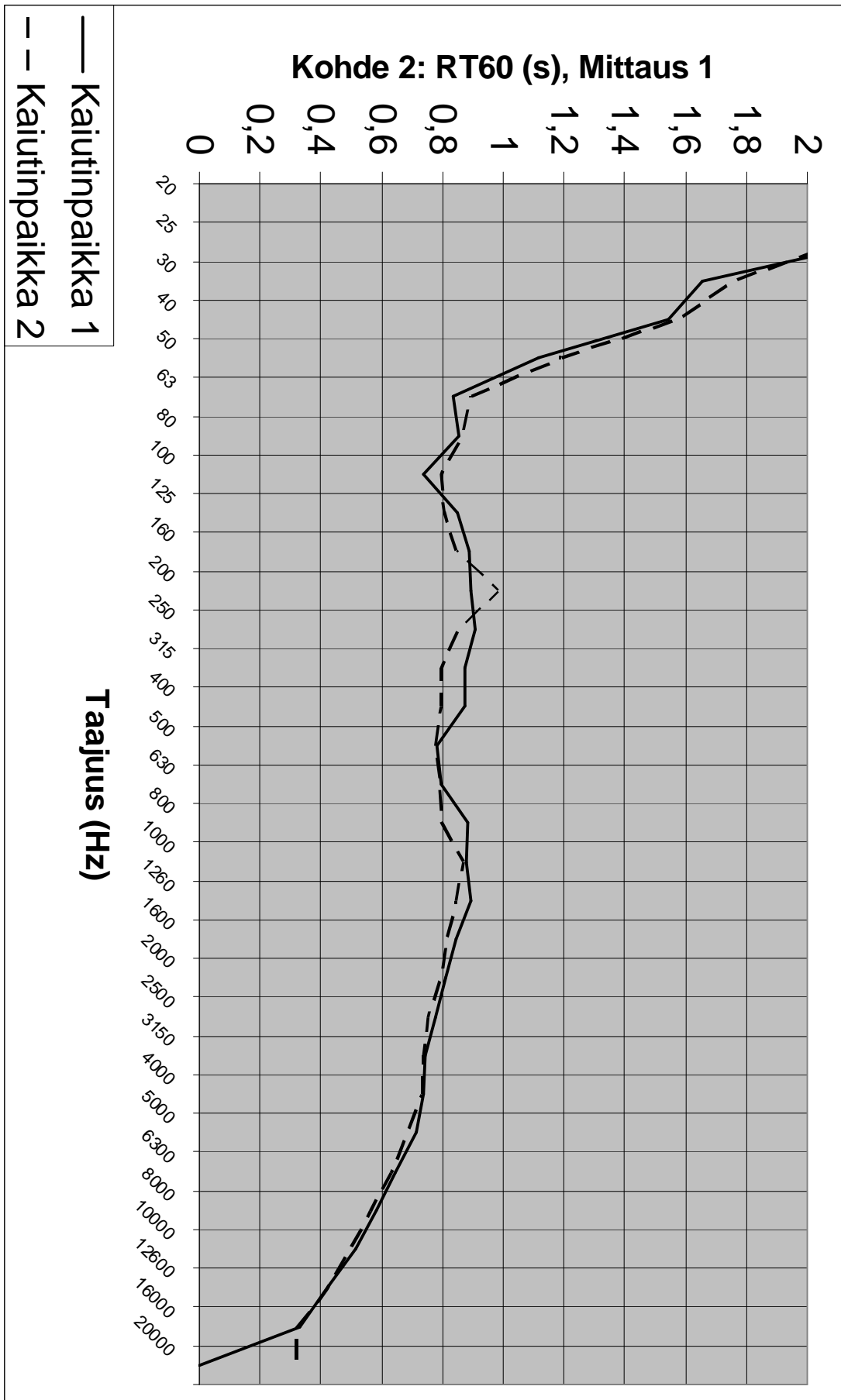
- [31] Petruszewicz, S. A.; Longmore, D. K. 1974. *Noise and vibration control for industrialists*. Lontoo. Paul Elek Ltd. 284 s.
- [32] <http://www.gradient.fi>. Luettu 4.10.2006.
- [33] Waterhouse, R. 1955. *Interference patterns in reverberation rooms*. J. Acoust. Soc. Am., vol. 27. s. 247.
- [34] IEC 60268-13. 1998. Sound system equipment - Part 13: *Listening tests on loudspeakers*. 71 s.
- [35] ITU-R BS.1116. 1997. *Methods for the subjective assessments of small impairments in audio systems including multichannel sound systems*. International Telecommunications Union. Geneve.
- [36] ISO 3382. 2000. Acoustics. *Measurement of reverberation time*. 25 s.
- [37] Suomen standardoimisliitto. 1998. SFS-EN ISO 140-4. Akustiikka. *Rakennusten ja rakennusosien ääneneristävyyden mittaaminen. Osa 4: Huoneiden välisen ilmaääneneristävyyden kenttämittaukset*. 28 s.
- [38] Suomen standardoimisliitto. 1998. SFS-EN ISO 140-7. Akustiikka. *Rakennusten ja rakennusosien ääneneristävyyden mittaaminen. Osa 7: Lattioiden iskuääneneristävyyden kenttämittaukset*. 21 s.
- [39] Farina, A. 2000. *Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique*. 108<sup>th</sup> AES Convention. Pariisi. 24 s.
- [40] <http://www.bruel-ac.com/eng/rasti.htm>. Luettu 30.3.2006.
- [41] Peltonen T. 2004. SFS-seminaari. *Standardi SFS 5907, Uusia mahdollisuuksia asuntorakentamisen. Ohjeita koulujen ja terveystieteiden suunnitteluun*. 40 s. <http://www.ecophon.fi>.
- [42] Karjalainen, M; Järveläinen, H. 2001. More about this reverberation science: Perceptually good late reverberation. 111<sup>th</sup> AES Convention. NY. 8 s.
- [43] Rossing, T.D.; Moore, F. R.; Wheeler, P. A. 2002. *The science of sound*. 3<sup>rd</sup> ed. SF. Addison Wesley. 783 s.
- [44] Porges, G. 1977. *Applied acoustics*. Lontoo. Edward Arnold Limited. 179 s.
- [45] Saint-Gobain Ecophon Oy. 2005. *Akustiikka ja Estetiikka* –lehti, 1/2005. s. 4-7.

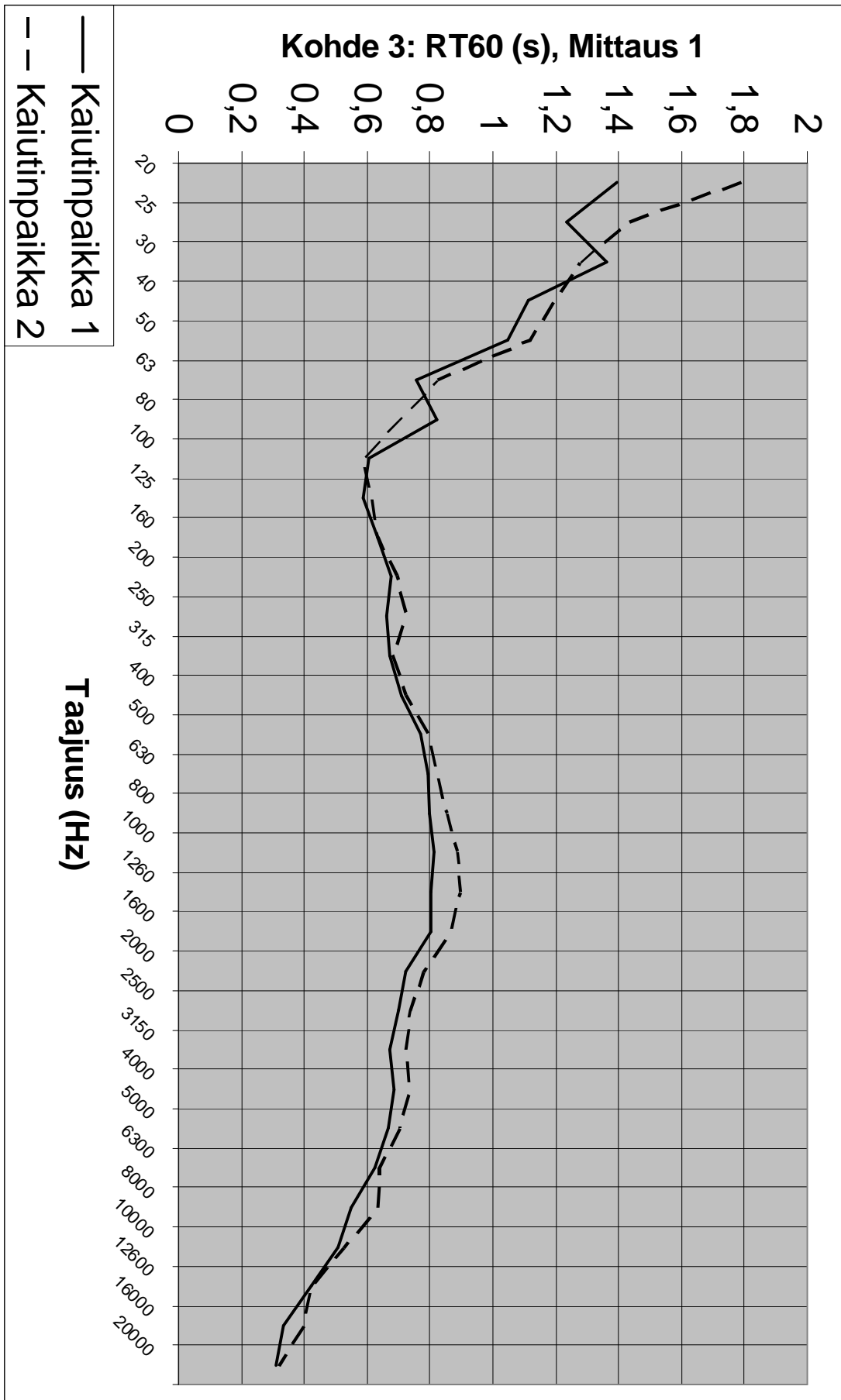
**LIITE A: MITATUT JÄLKIKAIUNTA-AJAT ENNEN PARANNUKSIA**

$f$ (Hz)	Kohde 1 (s)	Kohde 2 (s)	Kohde 3 (s)
20	2,7	4,9	1,6
25	2,5	2,2	1,3
31,5	2,4	1,7	1,3
40	1,7	1,6	1,2
50	1,5	1,2	1,1
63	1,1	0,9	0,8
80	1	0,9	0,8
100	0,9	0,8	0,6
<b>125</b>	<b>1</b>	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>
160	1,1	0,9	0,6
200	1,1	0,9	0,7
<b>250</b>	<b>1,1</b>	<b>0,9</b>	<b>0,7</b>
315	1,1	0,8	0,7
400	1,1	0,8	0,7
<b>500</b>	<b>1</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>
630	1	0,8	0,8
800	1,1	0,8	0,8
<b>1000</b>	<b>1,1</b>	<b>0,9</b>	<b>0,8</b>
1250	1,2	0,9	0,8
1600	1,2	0,8	0,8
<b>2000</b>	<b>1,2</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>
2500	1,1	0,8	0,7
3150	1,1	0,7	0,7
<b>4000</b>	<b>1</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>
5000	0,9	0,7	0,7
6300	0,8	0,6	0,6
8000	0,7	0,6	0,6
10000	0,6	0,5	0,5
12500	0,5	0,4	0,4
16000	0,4	0,3	0,4
20000	0,4	0,2	0,3

**Taulukko 7.1** Kohteiden 1-3 mitattujen jälkikaiunta-aikojen paikkakeskiarvot.



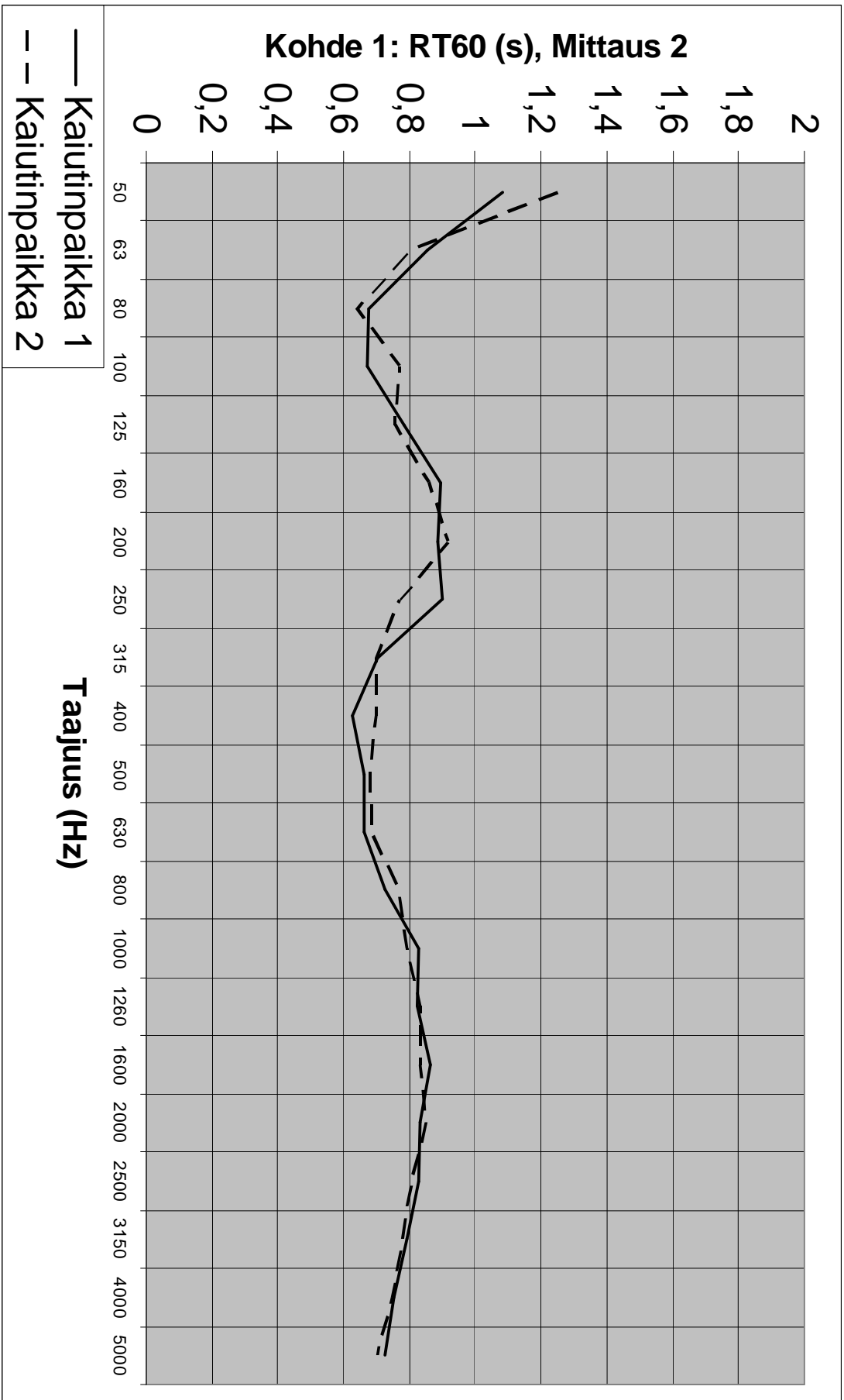




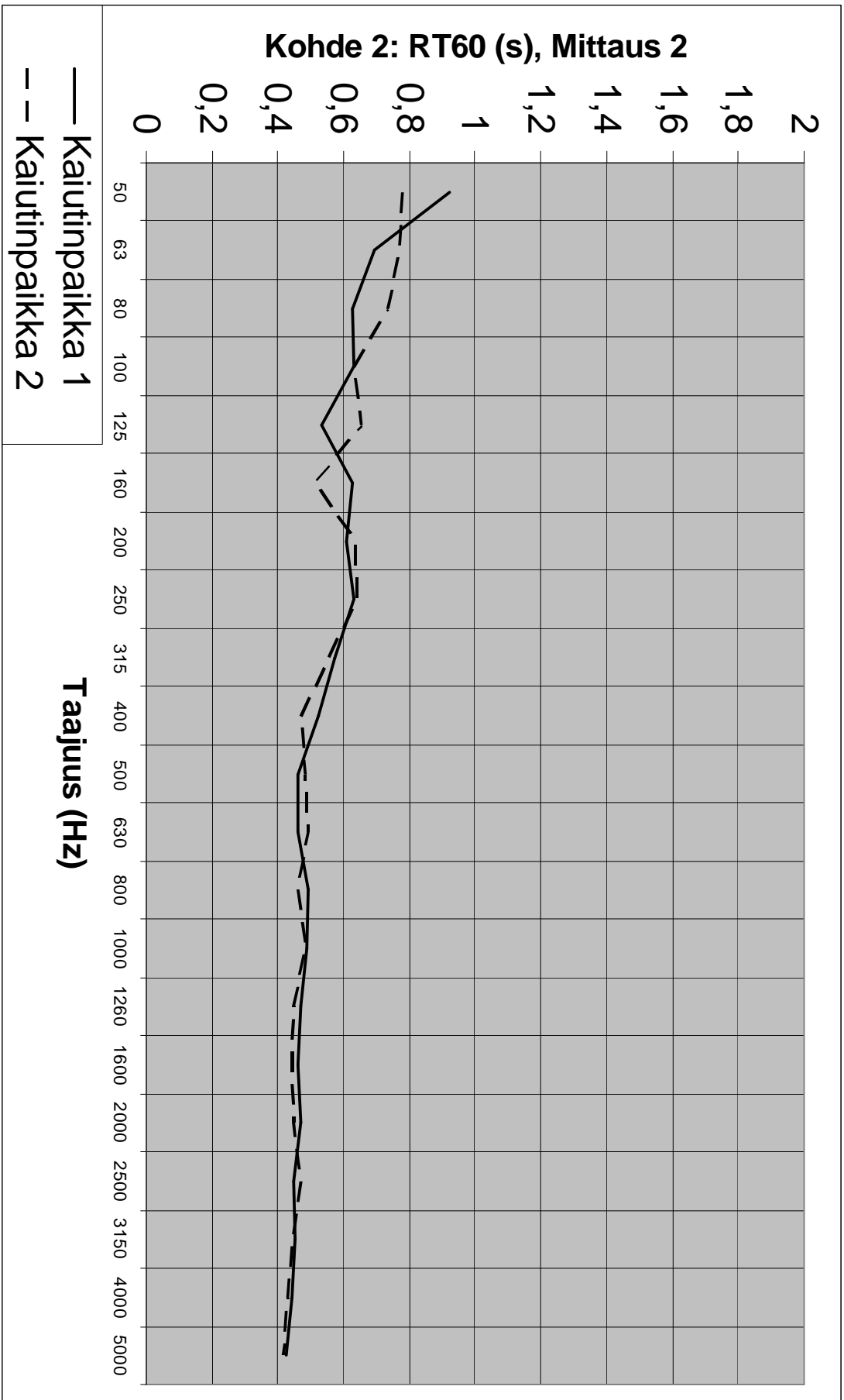
## LIITE B: MITATUT JÄLKIKAIUNTA-AJAT PARANNUSTEN JÄLKEEN

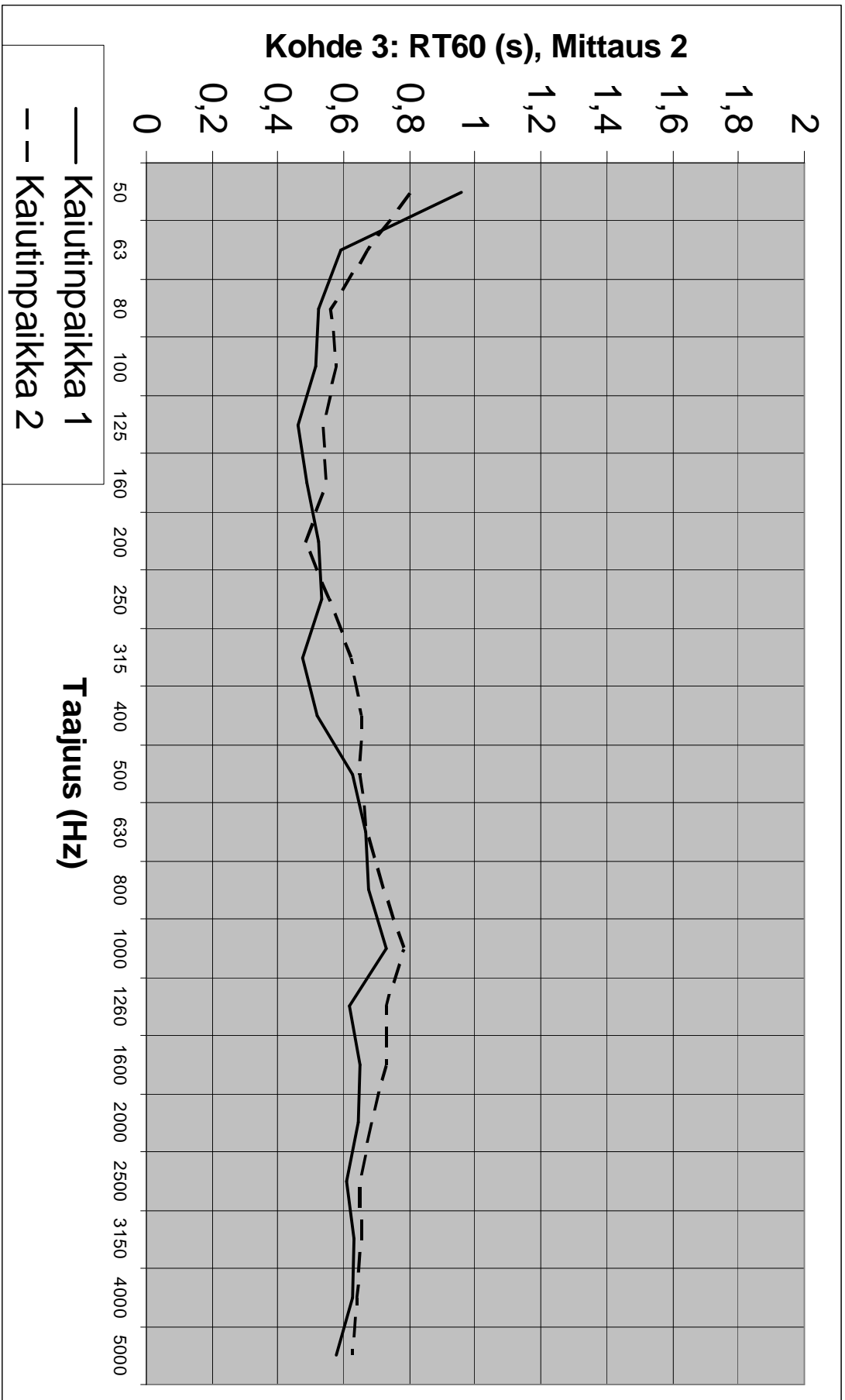
$f$ (Hz)	Kohde 1 (s)	Kohde 2 (s)	Kohde 3 (s)
20	-	-	-
25	-	-	-
31,5	-	-	-
40	-	-	-
50	1,2	0,9	0,9
63	0,8	0,7	0,6
80	0,7	0,7	0,5
100	0,7	0,6	0,5
<b>125</b>	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>	<b>0,5</b>
160	0,9	0,6	0,5
200	0,9	0,6	0,5
<b>250</b>	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>	<b>0,5</b>
315	0,7	0,6	0,5
400	0,7	0,5	0,6
<b>500</b>	<b>0,7</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>
630	0,7	0,5	0,7
800	0,7	0,5	0,7
<b>1000</b>	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>	<b>0,8</b>
1250	0,8	0,5	0,7
1600	0,8	0,5	0,7
<b>2000</b>	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>	<b>0,7</b>
2500	0,8	0,5	0,6
3150	0,8	0,4	0,6
<b>4000</b>	<b>0,8</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>
5000	0,7	0,4	0,6
6300	-	-	-
8000	-	-	-
10000	-	-	-
12500	-	-	-
16000	-	-	-
20000	-	-	-

Taulukko 7.2 Kohteiden 1-3 uudelleen mitattujen jälkikaiunta-aikojen paikkakeskiarvot.









## LIITE C: KUVIA ASENETUISTA VAIMENNUSMATERIAALEISTA



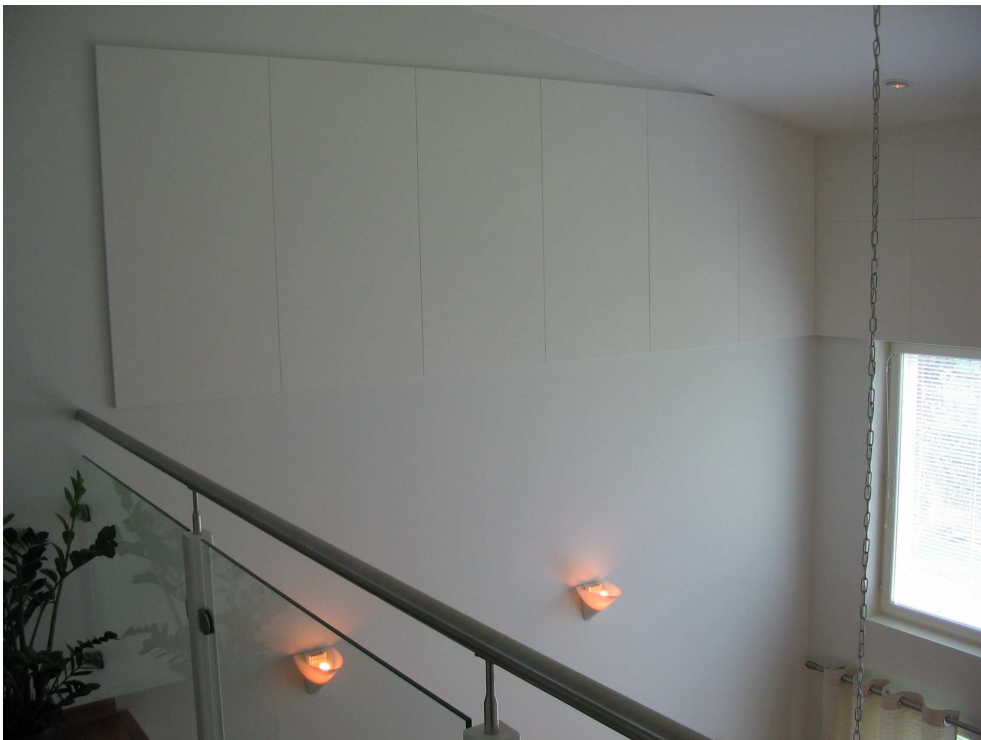
**Kuva 7.1** Kohteessa 1 seinään liimattu 9 m<sup>2</sup> akustiikkalevyjä.



**Kuva 7.2** Kohteessa 1 ruokailuhuoneen seinään kiinnitetty n. 2,4 m<sup>2</sup> akustiikkalevyä.



**Kuva 7.3** Kohteessa 2 asennettuja akustiikkalevyjä. Etualalla portaikon 2,16 m<sup>2</sup>:n asennus.



**Kuva 7.4** Kohteessa 2 olohuoneen seiniin asennettuja levyjä.



**Kuva 7.5** Kohteessa 3 olohuoneen seinään asennettuja akustiikkalevyjä.



**Kuva 7.6** Kohteessa 3 olohuoneen seinään aiemmin asennettuja akustiikkalevyjä.